Министерство по образованию и науке РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский государственный технический университет
имени Н. Э. Баумана»

Студенческое научно-техническое общество имени Н.Е. Жуковского

Научно-учебный комплекс
«Машиностроительные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Кафедра «Технологии обработки давлением» МГТУ им. Н.Э. Баумана

ООО «КванторФорм»

СБОРНИК СТАТЕЙ

Всероссийской научно-технической конференции студентов

«Студенческая научная весна 2014:

Машиностроительные технологии»

2 – 3 апреля 2014 г.

г. Москва, 2014 г.

Всероссийская научно-техническая конференция студентов

«Студенческая научная весна 2014: Машиностроительные технологии»

2-3 апреля 2014 года

Организаторы:

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Ректор **Александров Анатолий Александрович**

Студенческое научно-техническое общество им. Н.Е. Жуковского
Председатель **Шевчун Владимир Николаевич**

Научно-учебный комплекс «Машиностроительные технологии»
Декан **Колесников Александр Григорьевич**

ООО «КвантворФорм»
Директор **Стебунов Сергей Александрович**

Кафедра «Технологии обработки давлением» (МТ-6)
Заведующий каф. МТ-6 **Евсюков Сергей Александрович**

Контактная информация конференции:
Сайт: www.studvesna.ru
E-mail: stud-vesna@yandex.ru

Содержание

Состав оргкомитета …….. 5
Порядок проведения конференции ……. 7
Секция 1. Металлорежущие станки …… 8
Секция 2. Инструментальная техника и технология …….. 47
Секция 3. Технология машиностроения ……..... 55
Секция 4. Метрология и взаимозаменяемость ……... 119
Секция 5. Литейные технологии ……. 135
Секция 6. Технологии обработки давлением ……. 157
Секция 7. Технологии сварки и диагностики ……. 169
Секция 9. Промышленный дизайн ……... 255
Секция 10. Оборудование и технологии прокатки …… 315
Секция 11. Электронные технологии в машиностроении …… 363
Секция 12. Лазерные технологии в машиностроении …….. 453
Секция 13. Реновационные технологии в машиностроении …… 553

Состав оргкомитета
Всероссийской научно-технической конференции студентов
«Студенческая научная весна 2014: Машиностроительные технологии»

Председатель:

Колесников Александр Григорьевич, доктор технических наук, профессор, руководитель научно-учебного комплекса «Машиностроительные технологии»

Научный комитет

Евсюков Сергей Александрович	председатель научного комитета, зав. каф. МТ-6, д.т.н., проф.
Стебунов Сергей Александрович	сопредседатель научного комитета, директор ООО «КванторФорм», к.т.н.

Секция 1. Металлорежущие станки и оборудование

Утенков Владимир Михайлович	зав. каф. МТ-1, д.т.н., проф.
Додонов Владимир Владимирович	к.т.н., доц. МТ-1

Секция 2. Инструментальная техника и технологии

Древаль Алексей Евгеньевич	зав. каф. МТ-2, д.т.н., проф.
Литвиненко Анатолий Васильевич	к.т.н., доц. МТ-2

Секция 3. Технологии машиностроения

Васильев Александр Сергеевич	зав. каф. МТ-3, д.т.н., проф.
Заставный Евгений Александрович	к.т.н., доц. МТ-3

Секция 4. Метрология и взаимозаменяемость

Киселев Михаил Иванович	зав. каф. МТ-4, д.ф-м.н., проф.
Комшин Александр Сергеевич	к.т.н., доц. МТ-4

Секция 5. Литейные технологии

Семенов Вячеслав Иванович	зав. каф. МТ-5, к.т.н., доц.
Савохина Ольга Михайловна	ассистент МТ-5

Секция 6. Оборудование и технологии обработки давлением

Белокуров Олег Александрович	доц. каф. МТ-6, к.т.н.
Алленов Максим Геннадьевич	ассистент каф. МТ-6

Секция 7. Технологии сварки и диагностики

Коновалов Алексей Викторович	зам. зав. каф. МТ-7, д.т.н., проф.
Якушин Борис Федорович	проф. каф. МТ-7, д.т.н.

Секция 8. Материаловедение в машиностроении

Плохих Андрей Иванович	доц. каф. МТ-8, к.т.н.
Шевченко Светлана Юрьевна	доц. каф. МТ-8, к.т.н.

Секция 9. Промышленный дизайн

Терехова Наталия Юрьевна	зам. зав. каф. МТ-9, к.т.н., доц.

Секция 10. Оборудование и технологии прокатки

Семенов Иван Евгеньевич	проф. каф. МТ-10, д.т.н.
Шинкарев Александр Сергеевич	ассистент МТ-10

Секция 11. Электронные технологии в машиностроении

Панфилов Юрий Васильевич	зав. каф. МТ-11, д.т.н., проф.
Бычков Сергей Павлович	ассистент МТ-11

Секция 12. Лазерные технологии в машиностроении

Григорьянц Александр Григорьевич	зав. каф. МТ-12, д.т.н., проф.
Богданов Александр Владимирович	доц. каф. МТ-12, к.т.н.

Секция 13. Реновационные технологии

Ступников Владимир Петрович	зав. каф. МТ-13, д.т.н., проф.
Козлов Анатолий Владимирович	доц. каф. МТ-13, к.т.н.

Организационный комитет

Гладков Юрий Анатольевич	председатель организационного комитета, к.т.н., доц. МТ-6
Комшин Александр Сергеевич	сопредседатель организационного комитета – технический секретарь конференции, к.т.н., доц. МТ-4
Резвых Руслан Викторович	специалист ИТ, разработка сайта, выпускник каф. МТ-6, инженер ООО "КванторФорм"
Панова Ирина Андреевна	сбор материалов конференции и переписка с участниками, выпускница каф. МТ-6

Волонтеры конференции

Аникина Валерия	составление программы конференции, студентка группы МТ6-62
Зудина Ольга	подготовка материалов конференции, студентка группы МТ6-62

Порядок проведения
Всероссийской научно-технической конференции студентов «Студенческая научная весна 2014: Машиностроительные технологии»

1 апреля 2014г., вторник		
Заезд и поселение иногородних участников конференции		
2 апреля 2014г., среда		
с 9-00 до 09-45	**Регистрация участников конференции Вручение свидетельств участника конференции**	**Главный учебный корпус (ГУК), ауд.213 (Читальный зал старших курсов)**
с 10-00 до 10-35	**Торжественное открытие конференции**	
	Заседание научных секций	
с 12-00 до 16-00	Секция 1. Металлорежущие станки и оборудование	ГУК, каф. МТ-1 ауд. 114
с 11-00 до 15-00	Секция 3. Технологии машиностроения	ГУК, каф. МТ-3 ауд.299а
с 14-00 до 17-00	Секция 4. Метрология и взаимозаменяемость	Корпус МТ, каф. МТ-4 ауд. 218
с 13-00 до 15-00	Секция 5. Литейные технологии	Каф. МТ-5, ком. 20
с 11-30 до 15-00	Секция 6. Оборудование и технологии обработки давлением	Учебно-методический кабинет, здание каф.МТ-6
	Секция 7. Технологии сварки и диагностики	
с 11-00 до 16-00	Подсекция 7.1. Сварка	Каф. МТ-7, ауд. 209 (Зал заседаний)
с 11-00 до 16-00	Подсекция 7.2. Диагностика	Каф. МТ-7, ауд. 217
с 17-30 до 21-00	Секция 9. Промышленный дизайн	ГУК, ауд.208
с 11-15 до 15-00	Секция 10. Оборудование и технологии прокатки	ГУК, каф. МТ-10 (Конференц-зал)
с 11-00 до 15-00	Секция 11. Электронные технологии в машиностроении	Корпус МТ, каф. МТ-11, ауд.313 (Ротонда)
с 14-00 до 17-00	Секция 12. Лазерные технологии в машиностроении	Каф. МТ-12
с 15-00 до 19-00	Секция 13. Реновационные технологии в машиностроении	Корпус МТ, каф. МТ-13 ауд. 115
3 апреля 2014г. четверг		
с 10-00 до 15-00 03.04.2014	Секция 2. Инструментальная техника и технологии*	ГУК, каф. МТ-2 (Инструментальный кабинет)
	Секция 8. Материаловедение в машиностроении*	
с 12-00 до 15-00	Подсекция 8.1. Термическая обработка сталей	ГУК, каф. МТ-8, ауд.3
с 12-00 до 15-00	Подсекция 8.2. Термическая обработка цветных сплавов	ГУК, каф. МТ-8, ауд.15
с 15-00 до 21-00	Подсекция 8.3. Композиционные материалы	ГУК, каф. МТ-8, ауд.3
с 15-00 до 21-00	Подсекция 8.4. Химико-термическая обработка и покрытия	ГУК, каф. МТ-8, ауд.15
с 15-00 до 16-00	**Торжественное закрытие конференции Вручение дипломов и призов за лучшие работы.**	**ГУК, ауд.213 (Читальный зал старших курсов)**
4 апреля 2014г. пятница		
Отъезд иногородних участников конференции		

Секция I

Металлорежущие станки и оборудование

Председатель: **Утенков Владимир Михайлович**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой МТ-1

Ученый секретарь: **Додонов Владимир Владимирович**
кандидат технических наук, доцент кафедры МТ-1

УДК 621.9.067

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ – ЛЮНЕТОВ.

Александр Игоревич Власов [(1)], Никита Евгеньевич Гострый [(2)],
студент 5 курса [(1)], студент 3 курса [(2)],
кафедра «Металлорежущие станки»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.Г. Ягопольский,
старший преподаватель кафедры «Металлорежущие станки»

Детали типа «вал» характеризуются тем, что образованы наружными поверхностями вращения около одной оси. Длина вала значительно больше диаметра. По назначению, конструкции, весу, точности обработки, материалу и другим показателям детали этого типа очень разнообразны. В отдельных конструкциях возможно наличие внутреннего центрального отверстия.

Валы нашли широкое распространение в конструкциях практически всех технологических машин. В станкостроении встречаются валы ступенчатые и бесступенчатые, цельные и пустотелые, гладкие и шлицевые, валы-шестерни, а также комбинированные. В прокатном оборудовании применяют валы весом от нескольких килограммов до 30 т и более, при диаметрах до 1200 мм.

Существуют несколько методов обработки ступенчатых валов на токарных станках: без применения специальной технологической оснастки; с применением специальной технологической оснастки; на станках, оснащенных устройствами или суппортами для копировальной обработки. Как правило, токарная обработка ступенчатых валов производится не менее чем за два установа. При этом за первый установ полностью обрабатывается один конец вала, а за второй другой. Обработка длинных ступенчатых валов, где отношение длины к диаметру более 10, является одной из наиболее трудоемких операций. Это связано с малой жесткостью заготовки, вибрациями, сложностью достижения заданного качества, точности и производительности.

Для повышения производительности и качества обработки длинных цилиндрических поверхностей обычно применяют различные подводимые опоры (например, люнеты), повышающие жесткость заготовки. При этом схема установки люнетов, их конструкция, характер закрепления, выбор технологических баз оказывают решающее влияние на производительность обработки и точность диаметральных размеров вала. Схема установки опор, их конструкция, характер закрепления, выбор технологических баз оказывают решающее влияние на производительность обработки и точность диаметральных размеров вала [1]. Наибольшей трудоемкостью, с точки зрения выбора конструкции и мест установки люнетов, а также их настройки, отличается обработка валов в центрах. Выбор наружной поверхности вала в качестве технологической базы позволяет повысить производительность и точность обработки.

Как было сказано выше при обработке длинномерных валов на станках токарной группы применяются вспомогательные станочные приспособления – люнеты. Неподвижные люнеты позволяют зафиксировать заготовку на одном определенном диаметре, и остаются неподвижными до конца обработки. Подвижные люнеты имеют возможность перемещаться по поверхности обрабатываемой заготовки во время обработки, однако ограничением является неизменность диаметра цилиндрической поверхности базирования детали в люнете. В случае ступенчатой поверхности детали возникает либо ограничение по перемещению люнета, а соответственно и резца, либо необходимость останавливать обработку, устанавливать люнет на следующей

поверхности и возобновлять обработку, что влечет за собой увеличение погрешностей и времени изготовления деталей.

Изготовление длинномерной ступенчатой детали типа вал за один переход позволило бы уменьшить погрешности и вспомогательное время изготовления данной детали. Применение специальной конструкции люнета, позволяющей динамически изменять установочный диаметр в процессе обработки, позволит решить поставленную задачу. Внешний вид люнета представлен на рис. 1.

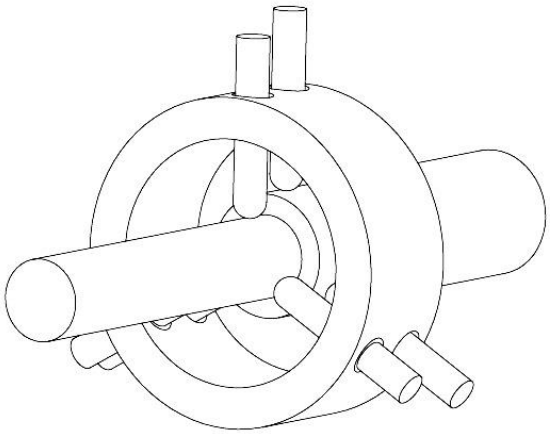


Рис 1. Внешний вид люнета.

В данном случае это возможно с динамическим изменением установочного диаметра люнета при переходе на следующий участок поверхности. Реализовать слежение системы за установочным диаметром возможно с использованием гидравлической системы со следящим золотником, применяющейся в копировальных станках, см. рис. 2.

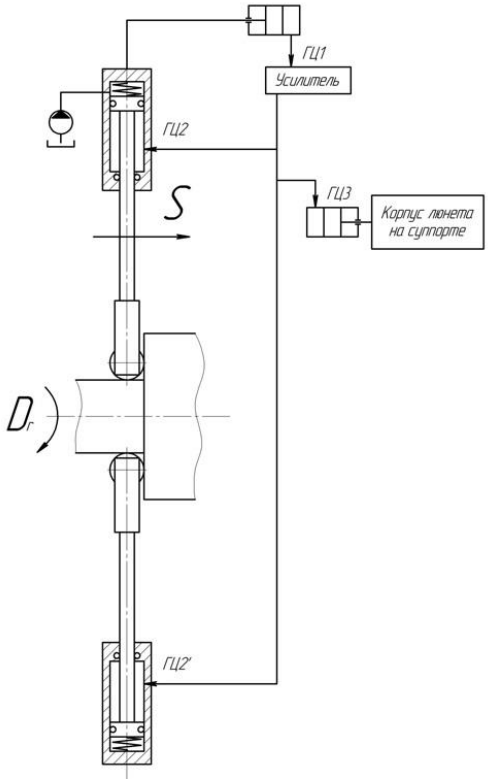


Рис.2 Принципиальная гидромеханическая схема устройства.

В этой схеме регистрацию усилия в осевом направлении осуществляет гидроцилиндр ГЦ1. Гидроцилиндры ГЦ2, ГЦ2', ГЦ2" осуществляют разжатие стержней

люнета в радиальных направлениях. Гидроцилиндр ГЦ3 осуществляет смещение люнета в осевом направлении для компенсации времени перехода с одной поверхности ступенчатого вала на другую. Принцип действия системы перехода подвижного люнета осуществляется следующим образом:

1. Регистрация усилия в осевом направлении. (Повышение давления в ГЦ1).
2. Передача через гидроусилитель давления:

2.1 на ГЦ2, ГЦ2' и ГЦ2" соответствующих стержней. Разжатие стержней.

2.2 на ГЦ3 на суппорте для компенсации времени перехода.

После завершения перехода люнет с ограниченной скоростью возвращается к исходному положению на суппорте.

Один из трех подвижных стержней люнета будет являться и измерительным преобразователем, два других отодвигаются и подвигаются в соответствии с первым. Первый стержень копирует поверхность детали, два других повторяют движение первого, вследствие чего люнет перенастраивается на следующую поверхность, что позволяет ему продолжить движение. Схема расположения стержней подвижного люнета показана на рис. 3.

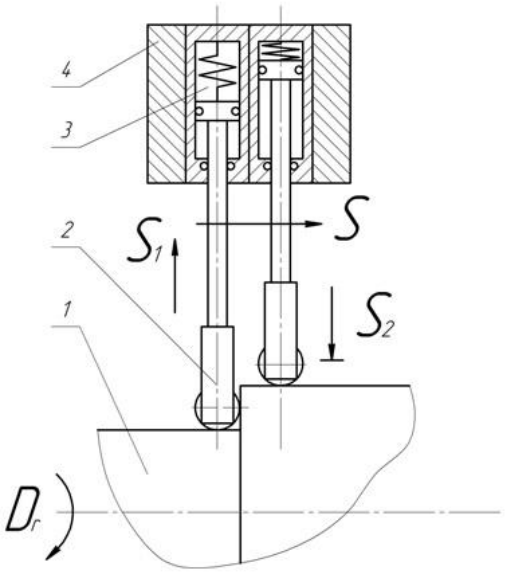


Рис.3 Расположение стержней подвижного люнета: 1 – заготовка, 2 – подвижный стержень люнета, 3 – гидроцилиндр, 4 – корпус люнета.

Последовательность перехода стержней люнета с одной базирующей поверхности на другую осуществляется следующим образом. В данном случае возникает необходимость фиксации детали во время изменения диаметра базирования люнета. Это можно осуществить с помощью другой тройки стержней поставленных параллельно. Переход на новую базирующую поверхность состоит из нескольких этапов, см. рис 4.

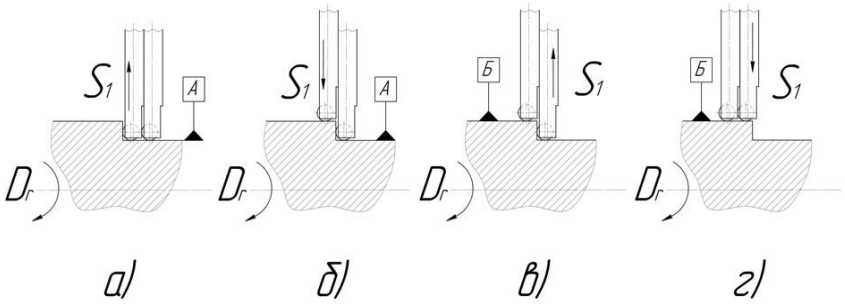


Рис. 4 Этапы перехода на новую базирующую поверхность:
а), б), в), г) – последовательность переходов.

На первом этапе (см. рис. 4а) осуществляется регистрация усилия в осевом направлении. Отвод первой тройки стержней до следующего размера диаметра. Вторая ступень неподвижна в радиальном направлении, и воспринимает динамические и статические нагрузки. На втором этапе (см. рис. 4б) происходит фиксация первой тройки стержней на диаметре. Восприятие нагрузок осуществляется обеими тройками стержней. На третьем этапе (см. рис. 4в) происходит регистрация усилия в осевом направлении. Отвод второй тройки стержней до следующего размера диаметра. Первая ступень неподвижна в радиальном направлении, и воспринимает динамические и статистические нагрузки. На заключительном этапе (см. рис. 4г) осуществляется фиксация второй тройки стержней на диаметре. Восприятие нагрузок осуществляется обеими тройками стержней.

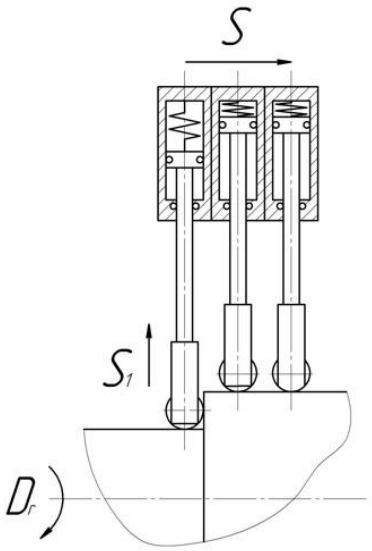


Рис. 5 Увеличение числа троек стержней.

Возможные коррективы конструкции и работы предлагаемого специального люнета:

1) Увеличение плавности хода, может быть достигнуто увеличением числа троек опорных стержней, см. рис. 5. В идеальном варианте предполагается проектирование сплошного массива троек. В данном случае необходима дифференциальная зависимость соседних троек в зависимости от их взаимного положения. К достоинствам можно отнести повышение точности позиционирования, повышение максимальной динамической нагрузки и увеличение плавности хода, однако это усложняет конструкцию, увеличивает время перехода через диаметр, а также увеличивает габариты люнета в осевом направлении.

2) Чувствительность, минимальный (максимальный) размер ступени перехода, необходимый для безусловного перехода по поверхности без потери базирования детали. В данном случае необходимо гарантировать базирование детали хотя бы одной тройкой стержней. Это достигается увеличением числа троек стержней или шага между ними.

3) Предельная динамическая нагрузка. В частных случаях базирования детали по одной тройке, необходимым условием является достаточная динамическая грузоподъемность одной тройки стержней. В случае нескольких троек стержней, одномоментно базирующих деталь при переходе, возможно уменьшение динамической нагрузки, и соответственно эффективного сечения отдельного стержня, уменьшение его конструктивных размеров.

4) Диапазон диаметров и длин деталей. Регулируется шириной стержней в пакете, общей длиной пакета. При переходе к торцу детали и удерживающему ее патрону

или заднему центру соответствующие стержни отодвигаются на длину максимального хода.

5) Добавление измерительного преобразователя (ИП) для регистрации перехода диаметра в качестве независимого элемента см. рис. 6. К достоинствам можно отнести повышение точности регистрации переходов и разделение измерительной, а также силовой систем. Недостатком же является незначительное усложнение конструкции.

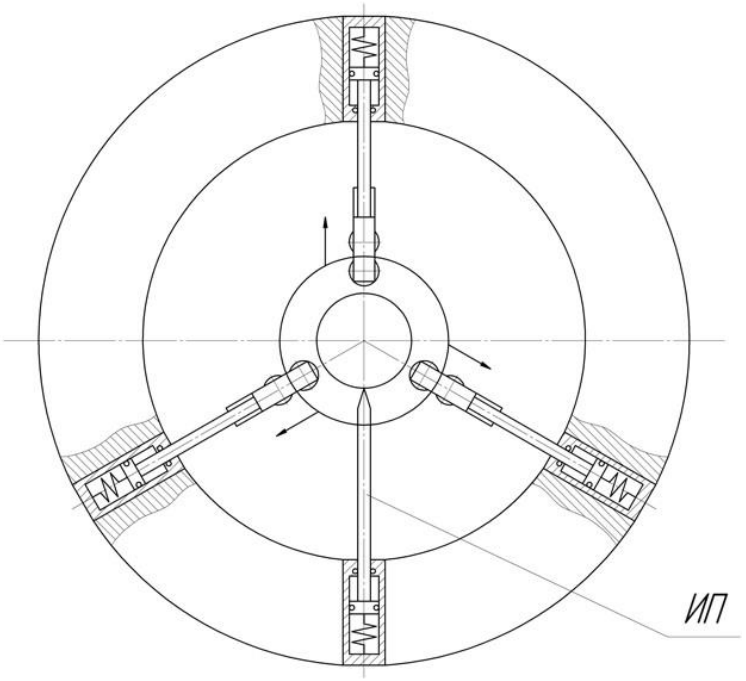


Рис. 6 Добавление измерительного преобразователя для регистрации перехода диаметра.

С использованием подвижного люнета данной конструкции возникают ограничения по перемещению суппорта и, соответственно, режущего инструмента в момент непосредственного перехода люнета на следующую поверхность базирования, вследствие чего обработка на это время прекращается, что увеличивает затраты по технологическому времени. Соответственно, данная конструкция может быть нецелесообразна в случае большого количества ступеней диаметра, либо в случае, когда разность двух последовательных диаметров значительна по сравнению с данной обрабатываемой поверхности. Однако в первом случае проблема компенсируется высокой скоростью реагирования и исполнения гидравлической системы, управляющей лишь стержнями люнета, а не суппортом в целом. Второй случай представляется маловероятным вследствие того, что люнет изначально необходим для обработки длинномерных деталей, и переходы размеров подобного рода технологически нецелесообразно обрабатывать на токарных станках.

Литература

1. Я. Н. Отений, Н. И. Никифоров, А. И. Журавлев, «Комбинированная обработка длинных валов» // СТИН. – 2006. - №6. – С.36 -38.
2. Станочные приспособления: Справочник. В 2-х т. / Ред. Совет: Б. Н. Вардашкин (пред.) и др. – М. : Машиностроение, 1984. – Т.1 /Под ред. Б. Н. Вардашкина, А. А. Шатилова, 1984. 592 с., ил.

3. Станочные приспособления: Справочник. В 2-х т. / Ред. Совет: Б. Н. Вардашкин (пред.) и др. – М. : Машиностроение, 1984. – Т.2 /Под ред. Б. Н. Вардашкина, В. В. Данилевского, 1984. 656 с., ил.

УДК 621.941

АЛГОРИТМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СТАНКОВ ПО ТРАЕКТОРИИ ДИВИЖЕНИЯ СУППОРТНЫХ УЗЛОВ

Александр Игоревич Власов [(1)], Никита Евгеньевич Гострый [(2)],
студент 5 курса [(1)], студент 3 курса [(2)],
кафедра «Металлорежущие станки»
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.Г. Ягопольский,
старший преподаватель кафедры «Металлорежущие станки»

Для металлорежущих станков, у которых основной критерий работоспособности – точность выполнения заданных функций, траектории формообразующих узлов (в частности – суппорта) становятся важнейшим источником информации о состоянии станка. Траектория перемещения узла – основной объект для измерения, оценки и анализа при программном испытании станка [1].

Содержание и характер диагностических процедур, глубина диагностирования, применяемые операции для обработки данных и другие этапы диагностики по параметрам траекторий поступательного движения суппортных узлов станков токарной группы зависят от объекта, предъявляемых к нему требований, аппаратурных возможностей и других факторов. Однако последовательность этапов, их значение и роль в общем процессе оценки качества и параметрической надежности станка как результата диагностирования должны быть едиными для различных случаев, инвариантными к объекту диагностирования и отражать логику решения поставленной задачи. Поэтому может быть разработана типовая методика диагностирования по параметрам траекторий поступательного движения суппортных узлов станков, в качестве основы которой может рассматриваться алгоритм анализа траекторий формообразующей точки инструмента, закрепленного в суппорте (рис. 1).

Формирование и ввод исходных данных предусматривает, прежде всего, задание номинальных характеристик объекта диагностирования. Включая номенклатуру параметров траектории, используемую при выполнении конкретной задачи диагностирования. Исходные данные включают, в принципе, используемые в алгоритме (рис. 1), однако в дополнение к ним должны быть заданы:

- диапазоны возможных режимов и условий эксплуатации станка (температура окружающей среды, внешние воздействия);
- наиболее форсированные режимы и экономические режимы чистовой обработки, а при наличии информации – гистограммы используемых при эксплуатации станка параметров режимов, например, подач;
- характеристики и требования, предъявляемые к лучшим образцам станков аналогичного назначения;
- требования к качеству деталей, обрабатываемых на диагностируемом оборудовании, и вытекающим из этого требования к отдельным характеристикам диагностируемого оборудования;
- предельно допустимые значения установленных параметров в соответствии с действующими стандартами, нормативами и требованиями заказчика.

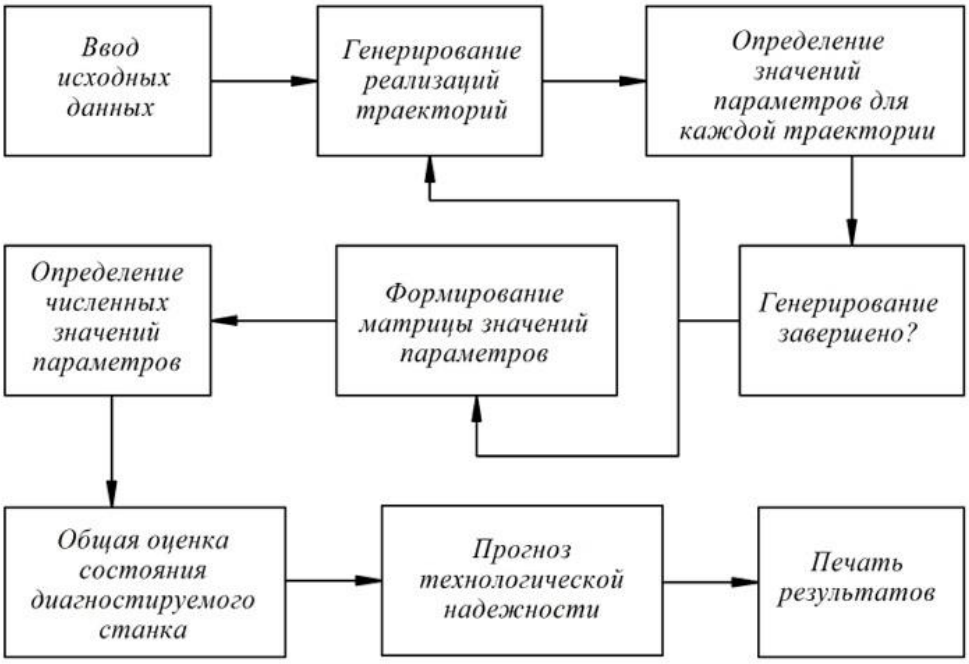


Рис 1. Алгоритм анализа траекторий формообразующей точки инструмента, закрепленного в суппорте, по управляющим параметрам.

Введенные данные должны однозначно задать условия реализации и параметры траектории формообразующего узла на основе которых будет осуществлен сбор и последующая обработка диагностической информации.

Основная информация, необходимая для диагностирования станка, поступает при проведении испытаний, в ходе которых регистрируются траектории формообразующих узлов станка. Методика предусматривает три принципиально различных способа формирования реализаций траекторий:

- генерирование на основе метода статистических испытаний (Монте-Карло) [2];
- при программном нагружении;
- при обработке заготовок – тестов.

Регистрация и последующие измерения параметров траектории осуществляют при:

- перемещении узла без нагрузки, когда основное влияние на отклонение траектории от заданной (теоретической) оказывают геометрические погрешности (изготовление, износ) направляющих;
- перемещении узла при фиксированной нагрузке, когда на отклонение траектории влияют также деформации элементов станка (контактные и собственные);
- фиксированном тепловом (холодное и прогретое) состоянии диагностируемого станка.

Если роль процесса резания в формировании теплового состояния станка незначительна (при экспериментальном подтверждении), то допустима оценка влияния основных источников тепловыделения при испытании станка на холостом ходу. Диагностирование должно учитывать весь спектр разнообразия возможных режимов обработки, условий эксплуатации станка и их статистические характеристики.

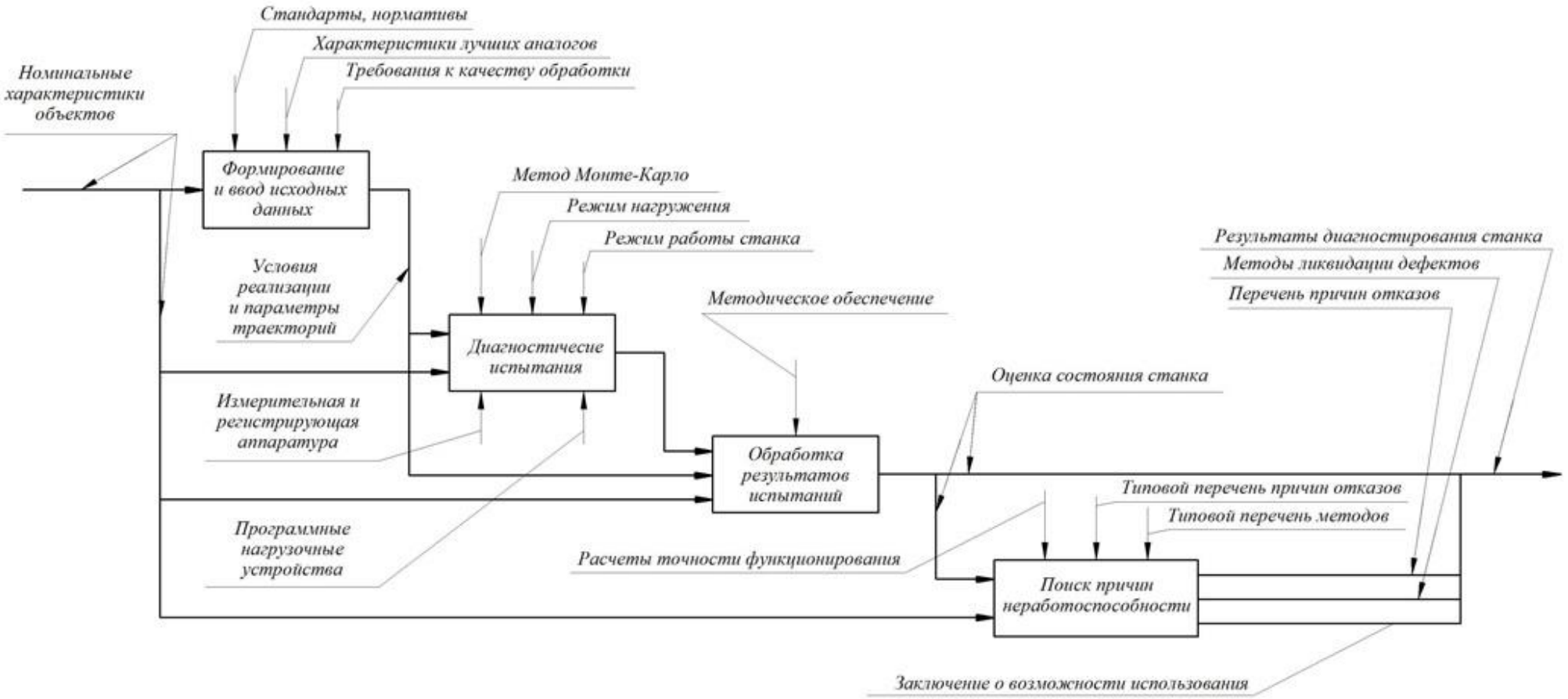


Рис 2. Структурная диаграмма типовой методики диагностирования.

Завершающий этап диагностирования связан с поиском причин неработоспособности станка в настоящем и будущем. При этом устанавливают причины изменения состояния диагностируемого объекта и определяют методы устранения их отрицательного влияния. Выполнение этого этапа базируется на оценке состояния станка или оценке областей состояний всех регламентированных параметров. При этом рассматривают лишь параметры, у которых запас надежности близок к единице или меньше её. Учитывают сложившийся баланс факторов, определяющих динамику изменения выходного параметра [3].

Если испытываемый станок изношен незначительно и параметрические отказы по точности будут предположительно возникать лишь по отдельным выходным параметрам, то процесс диагностирования целесообразно проводить в следующей последовательности:

1. Выполнить оценку всех параметров при нагруженном наиболее форсированными режимами и прогретом станке.
2. Выполнить полный цикл нагружений при различных состояниях станка с оценкой тех параметров, у которых запас надежности меньше или равен единице.
3. Определить причины потери станком работоспособности.

Итоговые результаты диагностирования станка включают:

- Оценку состояния (в настоящем) с указанием запасов надежности по важнейшим выходным параметрам;
- Перечень причин отказов (потери работоспособности) станка в настоящем и ближайшем будущем;
- Список методов ликвидации дефектов, приведших к параметрическим отказам;
- Заключение о возможности использования станка в его зафиксированном техническом состоянии.

Литература

1. Проников А. С. Программный метод испытания металлорежущих станков. – М.: Машиностроение. – 1985. – 288 с.
2. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений – М.: Наука. 1969. – 511 с.
3. Селиванов М. Н. Неопределённость результата измерений и доверительная погрешность результата измерений // Измерительная техника. – 1994. - №8. – С. 20-32.

УДК 621. 914

ОБЗОР КОНСТРУКЦИЙ ПРИВОДОВ ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СТАНКОВ С РАСШИРЕННЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ

Игорь Олегович Москвин,
студент 5 курса
кафедра «Резание материалов, металлорежущие станки и инструменты имени С. С. Силина»,
Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева

Научный руководитель: В. В. Михрютин,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Резание материалов, металлорежущие станки и инструменты имени С. С. Силина»

Современное машиностроение характеризуется увеличением доли высокоскоростной обработки в общем объеме механических операций. Это обусловлено, с одной стороны, совершенствованием методов получения заготовок и уменьшением припусков под обработку, с другой стороны, ростом требований к производительности обработки и качеству поверхностного слоя обрабатываемых деталей. В то же время, в ряде случаев требуется изготавливать детали из заготовок с большим припуском. Вместе с этим в машиностроении применяются различные материалы, обработка которых должна производиться на различных скоростях резания. Например, для обработки алюминиевых сплавов требуются скорости резания, намного превышающие скорости резания жаропрочных сплавов.

Важным направлением повышения производительности и качества обработки является применение обрабатывающих центров, позволяющих сконцентрировать операции резания на одном станке, и, следовательно, исключить потери времени, связанные с транспортировкой заготовки со станка на станок, и повысить точность обработки за счет предотвращения смены баз заготовки. При этом черновая и чистовая обработка должны выполняться также на одном станке.

Однако поскольку для черновой обработки с большими припусками требуется обеспечить работу в низкоскоростном диапазоне с большой величиной крутящего момента, а для чистовой обработки – в высокоскоростном диапазоне со значительно меньшим крутящим моментом, шпиндельные узлы станков должны обеспечивать работу в широком диапазоне регулирования. Уменьшение этого диапазона означает сужение технологических возможностей станка.

Широкий диапазон регулирования обеспечивает использование коробок скоростей, однако этот способ имеет значительное число недостатков, что привело к отказу от него в современных станках наиболее распространенных конструкций.

Существенное расширение диапазона регулирования частоты вращения шпинделя достигается при использовании синхронных и асинхронных электродвигателей с частотным регулированием. Их использование в приводе станков позволило во многих случаях использовать системы «прямого привода», то есть полностью отказаться от использования дополнительных механических передач.

Системы прямого привода главного движения создаются на основе асинхронных или синхронных электродвигателей встраиваемых в шпиндельные узлы [1]. Для примера рассмотрим синхронные электродвигатели компании Siemens AG серии 1FE1. Данные электродвигатели имеют несколько исполнений, различающихся числом полюсов. Четырехполюсные электродвигатели серии High speed отличаются высокой предельной

частотой вращения. При этом они имеют более низкие значения развиваемого крутящего момента по сравнению с шести- и восьмиполюсными электродвигателями серии High Torque. Это обстоятельство определяет конструкцию шпиндельного узла, который может быть либо высокоскоростным, либо низкоскоростным. Соответственно станок, в котором может быть использован высокоскоростной или низкоскоростной шпиндельный узел может быть использован в определенной области режимов обработки, что сужает его технологические возможности.

Для устранения этого недостатка ряд станкостроителей, использующих принцип модульного построения конструкции, предлагает оснащение станка сменными шпиндельными узлами, время смены которых минимизировано. Например, для станка Mori Seiki NH 5000 время смены шпиндельного узла снижено до 90 мин. Однако при обработке заготовки с большим припуском смена шпинделя весьма затруднительна.

Как показывает обзор конструкций современных станков, в ряде случаев станкостроители создают целую гамму модификаций станков, предназначенных для работы в различных условиях. Так, например, модификации токарных обрабатывающих центров Mori Seiki имеют конструкции, оснащенные как прямым приводом на базе встроенного синхронного двигателя, так и использующие коробки скоростей.

Таким образом, расширение технологических возможностей станка за счет увеличения диапазона регулирования частоты вращения шпинделя и обеспечения высоких значений крутящего момента в нижнем диапазоне частот вращения для современных станков, оснащенных приводом на основе синхронных двигателей, в настоящее время представляет собой актуальную задачу.

Проведенный информационный поиск позволил выявить ряд технических решений, позволяющих решить данную задачу. При этом ключевым признаком является использование системы прямого привода в области скоростной обработки.

Существующие технические решения можно разделить на две группы.

К первой группе относятся решения, использующие переключаемые механические передачи для получения высоких значений крутящего момента в области низкоскоростной обработки. Такой принцип используется в конструкции шпиндельного узла [2], показанной на рис. 1.

Шпиндель 1 установлен в подшипниках 2 и 3. На шпинделе 1 в подшипниках 4 расположен ротор 5, приводимый в движение вращающимся магнитным полем, создаваемым статором 6. Ротор 5 жестко соединен с шестерней 7 и кулачковой полумуфтой 8. На шпинделе 1 подвижно в его осевом направлении установлена кулачковая полумуфта 9, соединенная со втулкой 10. Повороту втулки 10 относительно шпинделя 1 препятствует шпонка 11.

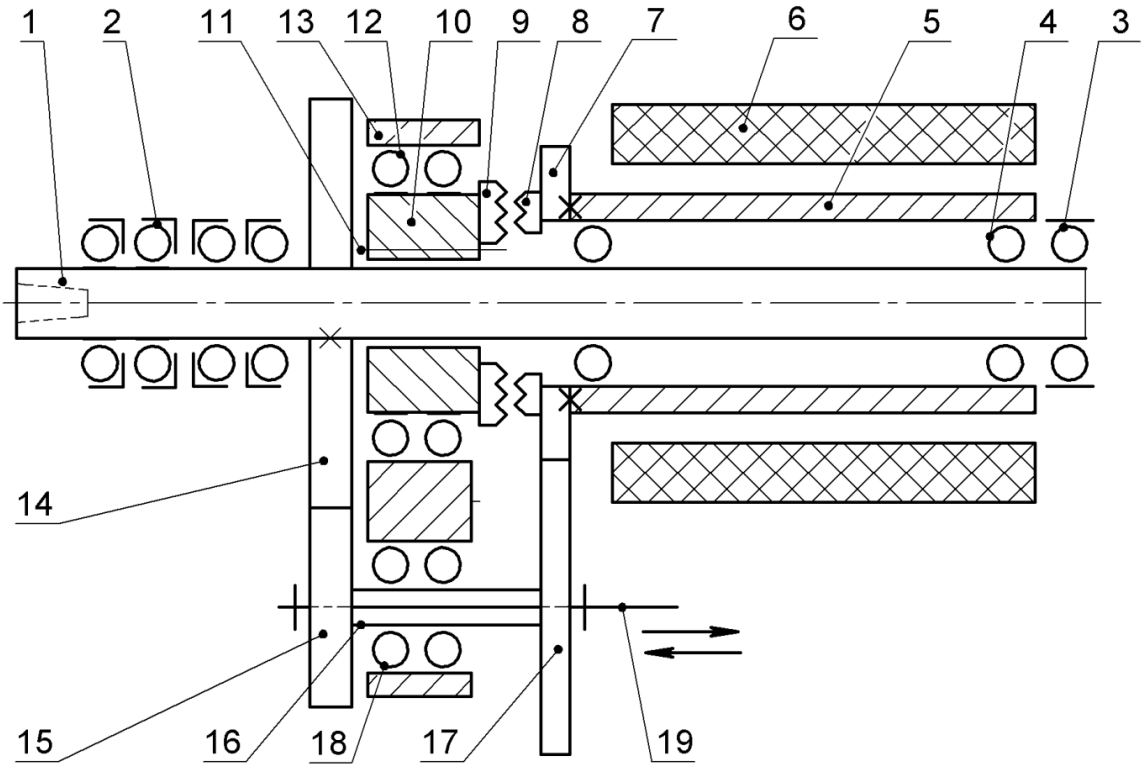


Рис. 1. Шпиндельный узел с переключаемыми передачами [1]

На втулке 10 расположено внутреннее кольцо подшипника 12. Наружное кольцо подшипника 12 установлено в подвижном корпусе 13.

На шпинделе 1 также закреплено зубчатое колесо 14. Зубчатое колесо 14 находится в зацеплении с шестерней 15, жестко соединенной втулкой 16 с зубчатым колесом 17. Втулка 16 установлена в подшипнике 18, наружное кольцо которого закреплено в подвижном корпусе 13. Втулка 16 установлена с возможностью вращения относительно толкателя 19.

При включении переменного напряжения на обмотках статора электродвигателя 6, ротор 5 приводится во вращение. При этом шестерня 7 передает вращение на зубчатое колесо 17, которое вращает втулку 16 с жестко закрепленной на ней шестерней 15. Шестерня 15 передает вращение на зубчатое колесо 14, жестко связанное со шпинделем 1.

Разность чисел зубьев шестерен 7, 15 и зубчатых колес 17, 14 приводит к понижению частоты вращения и увеличению крутящего момента на шпинделе 1. При перемещении толкателя 19 вправо происходит вывод из зацепления шестерен 16, 17 и включение кулачковых полумуфт 8, 9. При этом вращение, создаваемое ротором электродвигателя 5, будет передаваться напрямую на шпиндель 1.

Недостатками данного технического решения является необходимость использования ротора электродвигателя, имеющего большой диаметр, соответственно, ограничение диаметра шпинделя, значительные габариты конструкции и использование механических передач. Следует отметить, что в настоящее время данное направление совершенствования конструкций шпиндельных узлов практически не развивается.

Вторая группа технических решений использует дополнительный электродвигатель для повышения создаваемого крутящего момента. Пример такой конструкции (рис. 2) предложен в [3].

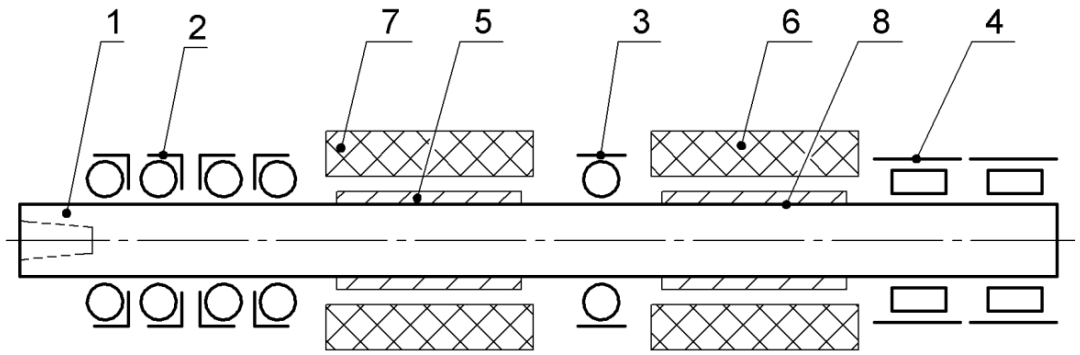


Рис. 2. Шпиндельный узел с дополнительным электродвигателем [2]

Шпинель 1 установлен в подшипниках 2, 3 и 4. На шпинделе закреплены роторы электродвигателей 5 и 6, приводимые во вращение электромагнитными полями, создаваемыми статорами 7 и 8.

Недостатком данного устройства является значительное увеличение длины шпинделя и габаритов шпиндельного узла.

Уменьшение длины шпинделя достигается в конструкциях, с подключаемым дополнительным приводом. Пример такого решения описан в [4]. В данном техническом решении дополнительный электродвигатель для повышения крутящего момента подключается через кулачковую муфту с гидравлическим управлением.

Пример кинематической схемы данной конструкции показан на рис. 3. Шпиндель 1 установлен в подшипниках 2 и 3. На шпинделе 1 установлен ротор электродвигателя 4, приводимый во вращение вращающимся магнитным полем, создаваемым статором 5. На торце шпинделя 1 жестко закреплена кулачковая полумуфта 6. Дополнительный электродвигатель состоит из статора 7 и ротора 8, установленного в подшипниках 9 корпуса 10. Ротор 8 через детали со шлицевым соединением 11 передает вращение на подвижную в осевом направлении втулку 12, жестко связанную с кулачковой полумуфтой 13. Перемещение втулки 12 для включения полумуфт 6 и 13 осуществляется полым штоком гидроцилиндра 14. Для кинематической развязки втулки 12 и штока гидроцилиндра 14 служат подшипники 15.

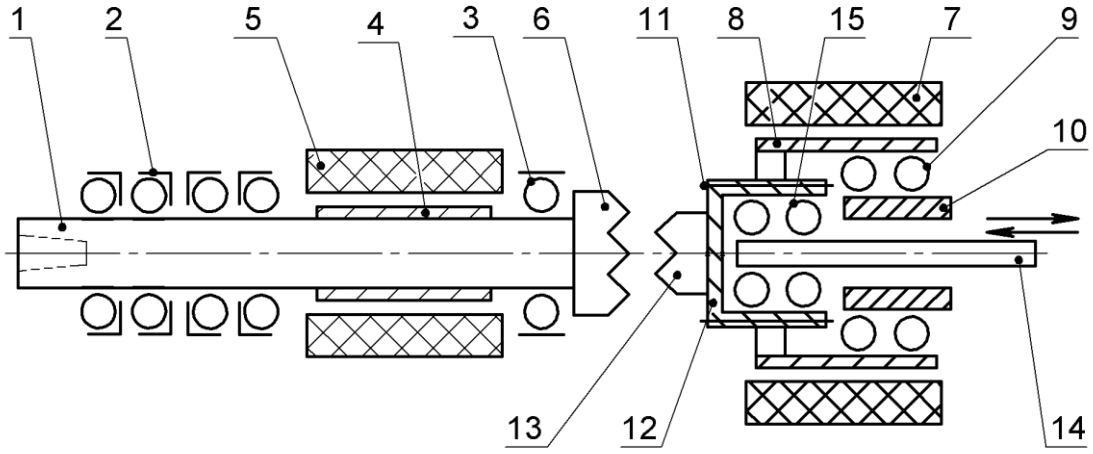


Рис. 3. Шпиндельный узел с подключаемым дополнительным приводом

Общими недостатками встраиваемых электродвигателей является высокая стоимость и необходимость принудительного охлаждения, что требует применения охлаждающих систем, усложняющих конструкцию и увеличивающих габариты станка.

При использовании дополнительных встраиваемых электродвигателей увеличиваются габариты шпиндельных узлов.

Проведенный обзор конструкций шпиндельных узлов показал, что в настоящее время актуальным является вопрос расширения диапазона регулирования шпиндельных узлов и повышения крутящего момента в нижнем диапазоне частоты вращения шпинделя. При этом существует два направления их совершенствования в данной области. Первое связано с использованием повышения крутящего момента за счет использования дополнительных механических передач. Второе, наиболее интенсивно развиваемое в настоящее время, основано на использовании дополнительных электродвигателей, встраиваемых в шпиндельный узел. При этом в известных устройствах имеется ряд недостатков, сдерживающих их серийное применение. Данное обстоятельство указывает на актуальность проведения работ в области совершенствования шпиндельных узлов за счет расширения диапазона регулирования и повышения крутящего момента в нижней области частот вращения.

Литература

1. Михрютин В. В., Шерстобитов М. А. Программные средства проектирования автоматизированных станков [Текст] // Оборудование и инструмент для профессионалов № 5, 2009. – С. 18 – 20.
2. Пат. 63131338, Япония, приоритет 26.08. 1988.
3. Пат. 4275803, Япония, приоритет 01.10. 1992.
4. Spindle device for machine tool: пат. ЕР 2062681, Европатент. Заявл. 05.11.2008, опубл. 27.06.2009, приоритет 27.11.2007.

УДК 621. 914

СОЗДАНИЕ ПРИВОДА ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ С РАСШИРЕННЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СТАНКОВ

Игорь Олегович Москвин,
студент 5 курса,
кафедра «Резание материалов, металлорежущие станки и инструменты имени С. С. Силина»,
Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева

Научный руководитель: В. В. Михрютин,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Резание материалов, металлорежущие станки и инструменты имени С. С. Силина»

Анализ конструкций современных приводов главного движения показал, что одним из наиболее перспективных путей их совершенствования является создание комбинированных приводов на основе двух двигателей с различными характеристиками. Недостатком таких приводов является высокая стоимость встраиваемых электродвигателей и необходимость создания дополнительной системы охлаждения. Применение систем охлаждения для стабилизации температуры элементов несущей системы. Для организации охлаждения интенсивно нагреваемых узлов внутри них выполняют каналы, по которым прокачивают охлаждающую жидкость.

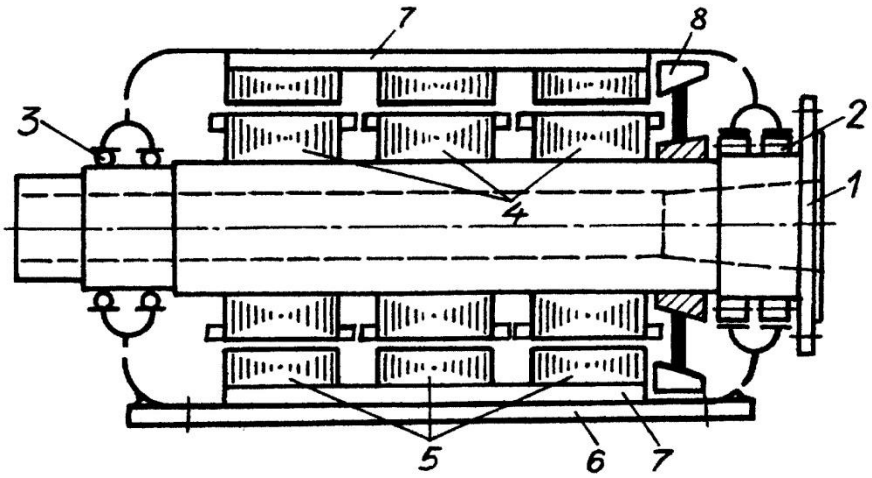


Рис.1 Шпиндельный узел с дополнительными электродвигателями [3]

Привод металлорежущего станка состоит из шпинделя 1, установленного в подшипниках 2 и 3, трех роторов 4, жестко закрепленных на шпинделе 1, и трех статоров 5, жестко установленных внутри корпуса 6 привода и имеющих охладительные ребра 7, расположенные по всему периметру. Шпиндель 1 снабжен крыльчаткой 8, обдувающей охладительные ребра электродвигателей при их работе. Недостатком данного устройства является значительное увеличение длины шпинделя и габаритов шпиндельного узла.

Создание инновационных конструкций станков имеет огромное значение. Вместе с тем, на предприятиях имеется достаточно большое количество морально устаревших станков. Станины и другие элементы несущих систем данных станков прошли естественное старение и значительно меньше подвержены короблению при перераспределении остаточных напряжений, чем соответствующие элементы новых станков. Направляющие станков могут быть восстановлены при наличии на предприятиях соответствующего оборудования. Модернизация позволяет значительно расширить технологические возможности станка за счет применения новой системы управления. При этом создается станок, технологические показатели которого сопоставимы с показателями нового оборудования. Затраты на модернизацию обычно составляет от 30 до 60% от стоимости нового станка. Это делает необходимым проведение конструкторских работ по проведению модернизации оборудования.

Разработка проекта модернизации станка по сравнению с инновационными проектами обладает рядом особенностей. Прежде всего, разработка модернизации связана с привязкой к существующей несущей системе станка. Затем при создании проекта необходимо пользоваться комплектующими, не приводящими к значительному удорожанию проекта.

В качестве базового станка для проведения модернизации выбран достаточно широко распространенный обрабатывающий центр ИР500 ПМФ4.



Рис.2 Металообрабатывающий центр ИР500ПМФ4.

Привод вращения шпинделя данного станка осуществляется через коробку скоростей, расположенную в шпиндельной бабке. Вращение от выходного вала коробки скоростей на шпиндель передается через зубчатую муфту, разгружающую шпиндель от действия сил, возникающих в зубчатых передачах.

Использование зубчатых передач ограничивает максимальную частоту вращения шпинделя, создает дополнительные вибрации несущей системы, что делает невозможным осуществление на станке высокоскоростной чистовой обработки.

Проведенный обзор позволил предложить конструкцию привода главного движения станка.

На низких скоростях резания при черновой обработке вибрации в зубчатых передачах не сказываются существенно на шероховатости поверхности, а нагрев существенно уменьшается. Поэтому признано целесообразным сохранение коробки скоростей, при замене ее привода постоянного тока на относительно дешевый асинхронных электродвигатель. Такое решение позволит проводить обработку заготовок из труднообрабатываемых материалов, а также заготовок, имеющих большие припуски.

Для работы в области высокоскоростного резания предложено оснастить шпиндельный узел станка синхронным двигателем с частотным регулированием. В области низкоскоростной обработки крутящий момент обеспечивается в значительной степени за счет использования вращения, передаваемого на шпиндель от асинхронного электродвигателя через коробку скоростей, а в области высокоскоростной – встроенным синхронным двигателем.

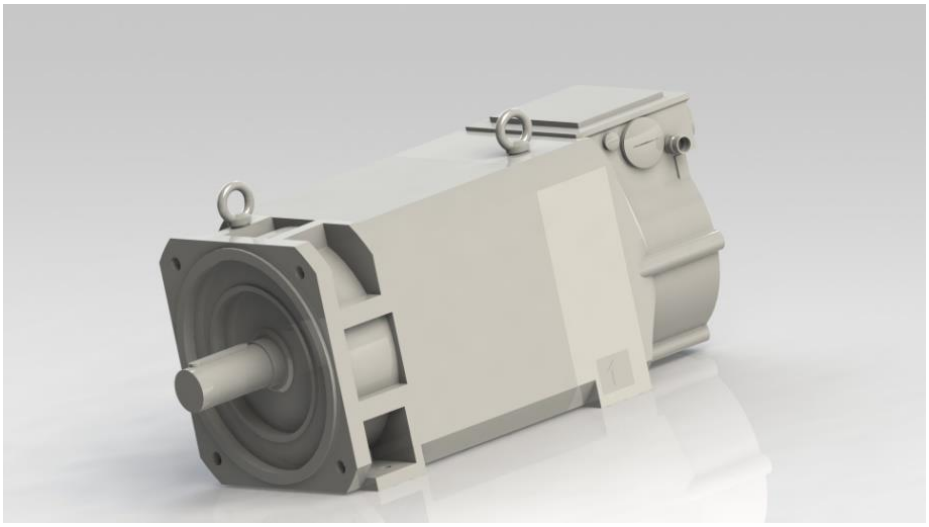


Рис.3 Асинхронный электродвигатель 1PH7163-2ND03-0BB0-ZM39

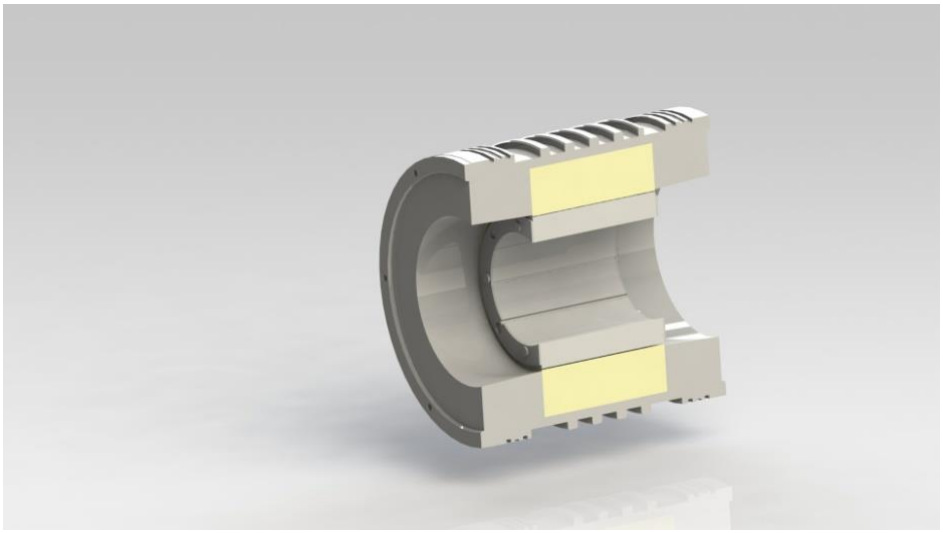


Рис.4 Встраиваемый синхронный электродвигатель 1FE1092-4WP11-1BR0

Механические характеристики использованных электродвигателей:

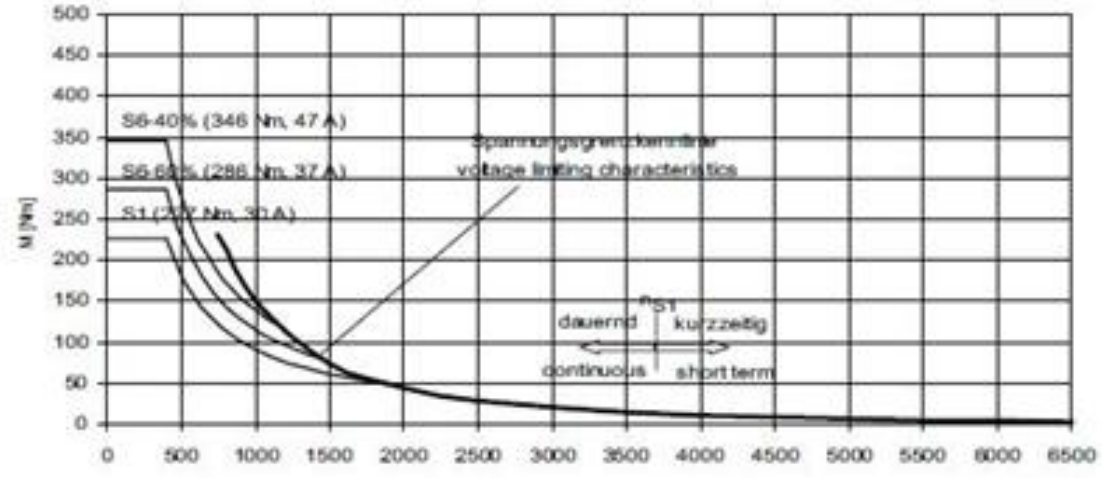


Рис. 5 Характеристике двигателя серии 1PH7

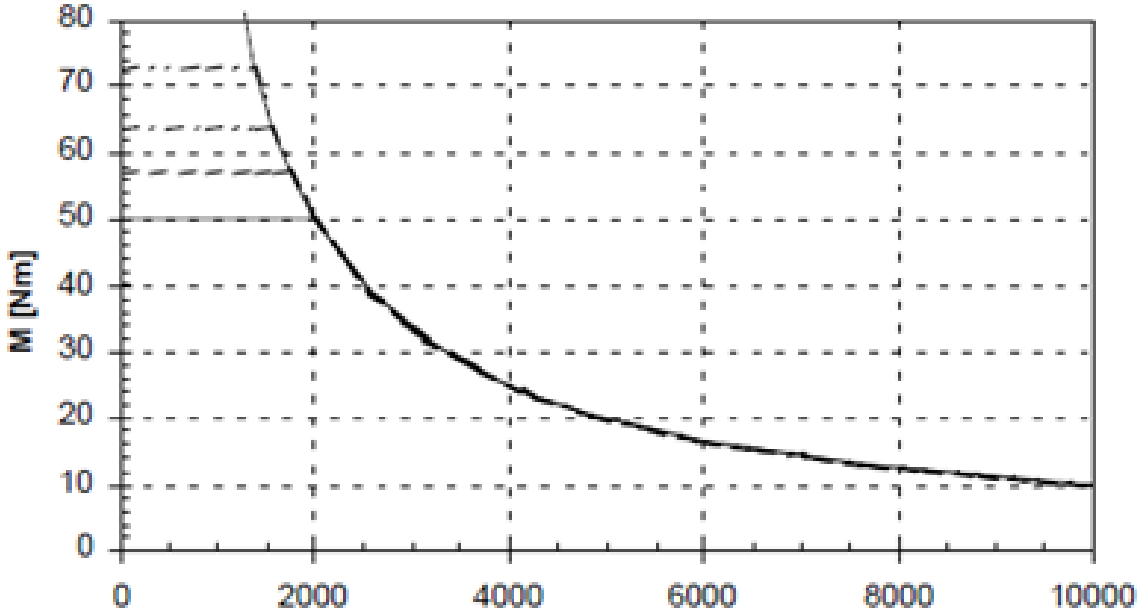


Рис. 6 Характеристике двигателя серии 1FE1092

Графики, показывают, что при частоте вращения 2000 мин$^{-1}$, суммарный крутящий момент составляет 100 Нм. В области низкоскоростной обработки(например 300 мин$^{-1}$), суммарный крутящий момент составляет 400 Нм

На основе используемой в РГАТУ имени П.А. Соловьева методики выполнения курсовых и выпускных квалификационных работ [1, 2] разработана трехмерная цифровая модель привода. Работы проведены с применением современных средств создания цифровых моделей изделий и приводной техники, выполнены необходимые расчеты.

На шпинделе, закреплен моментный электромотор, состоящий из статора и ротора. Ротор электродвигателя закреплен на шпинделе с помощью прессовой посадки. Статор расположен в корпусе шпиндельного узла. Данный электродвигатель обеспечивает высокую скорость вращения и подходит для чистовых операций. При работе на черновых тяжелонагруженных режимах для съема припусков значительной величины и обработки заготовок из труднообрабатываемых авиационных материалов к шпинделю через понижающую передачу подключается асинхронный электродвигатель. Вал электромотора вставлен в вал-шестерню, которая образует первичный вал коробки передач. Вал шестерня передает вращение на вторичный вал, который имеет передачи: прямая, нейтральная, повышающая. Прямая передача включена, когда взаимодействует шестерня с шестерней. Повышающая включается, когда шестерня взаимодействует с шестерней. Нейтральная передача выбрана, когда блок шестерен, а так же шестерни находится вне зацепления. Все три вала коробки собраны на радиальных подшипниках. Валы коробки передач находятся в корпусе. Шпиндель установлен на опоры, передняя опора - триплекс. Задняя опора собрана по схеме дуплекс. Муфта служит для соединения конца шпинделя, с выходным валом коробки передач. Ориентация шпинделя при смене инструмента обеспечивается синхронным двигателем.

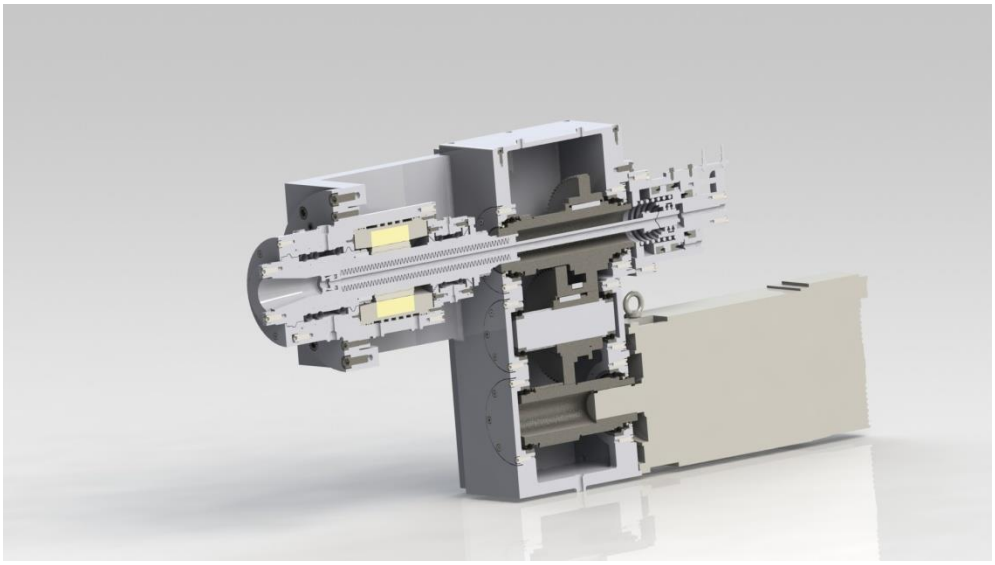


Рис.5 Конструкция шпиндельного узла ИР500ПМФ4 с двумя электродигателями.

Предложенная конструкция позволяет увеличить крутящий момент в области низкоскоростной обработки, путем установки дополнительного электродвигателя, с возможностью ведения высокоскоростной точной обработки. Разработка позволяет создать станок с широкими технологическим возможностями, позволяющий проводить обработку заготовок из труднообрабатываемых материалов.

Литература

1. Михрютин В.В., Михрютина А.В. Использование SIEMENS VIRTUAL MACHINE при изучении конструкций и программирования станков с ЧПУ// Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П. А. Соловьева.- Рыбинск: РГАТА, 2009. - № 1 (15) С 141 – 147.

2. Михрютин В.В. Автоматизация проектирования систем управления и привода станков на основе компонентов SINUMERIK// Вестник РГАТА имени П.А. Соловьева, - Рыбинск: РГАТА, 2009, с 137 – 140.

3. Полезная модель 45665, Россия, приоритет 27.05. 2005.

УДК 621.09+

БУДУЩИМ СПЕЦИАЛИСТАМ В ОБЛАСТИ СТАНКОСТРОЕНИЯ

Сергей Кириллович Руднев,
студент 5 курса,
кафедра «Металлорежущие станки»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.Г. Ягопольский,
старший преподаватель кафедры «Металлорежущие станки и комплексы»

Существует много разнообразных и интересных профессий. Ближе к окончанию школы выпускник стоит перед выбором, который определит всю его дальнейшую жизнь - выбор своей будущей специальности. Работа должна приносить не только материальное, но и эмоциональное удовлетворение, а так же быть интересной и творческой.

Специальность инженера-конструктора позволяет человеку раскрыть свои способности, предоставляет возможность для самосовершенствования и саморазвития. Конструктор металлорежущих станков обладает такими возможностями, но кроме этого именно от его деятельности зависит уровень технического развития страны. Станки являются основой развития техники и промышленности, без них не возможно ни одно производство.

Уникальность станкостроительной отрасли состоит в том, что она предопределяет прогресс машиностроения и приборостроения в целом. Процесс создания любых изделий – от миниатюрных электронных приборов до космических аппаратов – не обходится без механической обработки, осуществляемой на металлорежущем оборудовании.

Все окружающие нас изделия, например: ручка, мебель, машина, самолет, корабль были каким-то образом изготовлены. Перечисленные выше устройства состоят из деталей - простейших частей изделий. Существует несколько способов получения деталей:

Литье - самый древний способ. В наши дни его применяют для изготовления шоколада, ювелирных изделий, заготовок для деталей сложной конфигурации;

Обработка давлением (прокатка, штамповка) - все столовые приборы, корпуса и колеса вагонов, а также трубы и весь металлический прокат различного профиля, как правило, получают этим методом;

Механическая обработка - самый распространенный метод изготовления деталей (80% изделий подвергаются механической обработке), так как все вышеперечисленные методы не обеспечивают необходимую точность и качество изделия.

Механическая обработка производится на специальном оборудовании – металлорежущих или деревообрабатывающих станках. Металлорежущий станок - это сложная технологическая машина, содержащая механические, электрические, гидравлические и пневматические узлы и механизмы. Станок предназначен для обработки заготовок методом снятия стружки, т.е. удаления части материала с заготовки. Заготовкой для металлорежущего станка может быть отливка (результат литья) или поковка (результат обработки давлением), также в качестве заготовки может выступать и сортовой прокат (круглые, шестигранные, квадратные прутки и пр.) Заготовка устанавливается на станок в приспособление, после чего с помощью режущего инструмента, так же установленного в свое приспособление, с нее удаляются излишки материала, и получается готовая деталь. Примером приспособления может быть патрон в дрели, а примером инструмента - сверло.

Все существующие станки можно разделить на два вида по принципу автоматизации:

- Механические или универсальные — ими непосредственно управляет человек;
- Автоматизированные или станки с ЧПУ (числовым программным управлением) — управляются компьютером.

Универсальные станки имели широкое применение в прошлом веке. На современном производстве используются станки с ЧПУ. Оператор станка с ЧПУ выполняет следующие действия: подготовку управляющей программы, установку инструментов, загрузку заготовки.

Станки с ЧПУ способны в автоматизированном цикле выполнять полную обработку детали. Причем смена инструмента и заготовки часто производится автоматически.

Как правило, для обработки детали требуется набор инструментов: резцы разных видов, сверла, фрезы. Оператору современного станка не нужно задумываться, в какой момент менять инструмент, станок произведет замену сам.

В зависимости от вида детали и сложности её поверхностей используют различные типы станков. Это связано с тем, что узлы станка взаимно перемещаются строго определенным образом. Такие перемещения называются подачами. Подачи могут быть

прямолинейными или круговыми. Оси, относительно которых совершаются движения рабочими органами станка, называют координатами.

Токарный станок — самый старый и распространенный вид станков. Предназначены главным образом для обработки наружных и внутренних цилиндрических, конических и фасонных поверхностей, нарезания резьб и обработки торцев деталей вращения.





Рис.1.Пример типовых деталей для токарной обработки

В роли инструмента на токарном станке могут выступать различные резцы, сверла, плашки, метчики.

В качестве заготовки для токарной обработки может использоваться пруток или любое другое тело вращения. Заготовка закрепляется в специальном зажимном приспособлении, например, в кулачковом патроне, который, в свою очередь, фиксируется на шпинделе станка. Во время обработки заготовка вращается, а инструмент перемещается прямолинейно в продольном или поперечном направлении относительно оси заготовки. При продольном перемещении обрабатываются цилиндрические, конические и фасонные поверхности. При поперечном перемещении обрабатываются торцы, пазы.

Токарный станок состоит из основных узлов. Рассмотрим их:

Станина – самая массивная часть станка, на которой смонтированы все остальные узлы.

Передняя бабка – узел станка, в котором установлен шпиндель.

Шпиндель – узел станка, на котором крепится приспособление для установки заготовки. Шпиндель сообщает заготовке вращательное движение.

Суппорт – узел станка, который совершает продольное перемещение относительно оси заготовки. На суппорт устанавливается резцедержка.

Резцедержка – узел станка для крепления инструмента – резцов. Она совершает поперечное перемещение относительно оси заготовки.

Револьверная головка – узел станка для крепления инструмента. Вмещает от 8 до 32 инструментов, позволяет менять инструмент во время обработки (на рисунке не показан). Револьверная головка устанавливается вместо резцедержки, либо как дополнительное устройство.

Сочетание перемещений суппорта и резцедержки обеспечивает обработку всех перечисленных поверхностей.

Задняя бабка - предназначена для поддержания конца длинных заготовок в процессе обработки, а также для закрепления и подачи осевых инструментов, например, сверел.

Устройство ЧПУ – блок управления станком, куда загружается управляющая программа. Оно выполняет управление всеми движениями станка.



Рис.2.Узлы токарного станка

Токарные станки имеют от 3 до 5 управляемых координат: продольное и поперечное перемещение суппорта с инструментами, ориентированный поворот шпинделя, продольное перемещение задней бабки, ориентированный поворот и перемещение противошпинделя – устанавливается вместо задней бабки. Количество суппортов или револьверных головок может быть различным (до трех). В этом случае количество управляемых координат увеличивается. Встречаются конструкции, в которых одновременно установлены и суппорт и револьверная головка. Так же есть конструкции станков, в которых два шпинделя, два суппорта или револьверных головки и противошпиндель, в таком случае возможно до 8 управляемых координат.

Другая группа станков – это *фрезерные станки***.** Фрезерование является одной из основных технологических операций в металлообработке. Фрезерные станки предназначены для обработки плоскостей, уступов, пазов и фасонных поверхностей. Во время обработки на фрезерном станке вращается инструмент, а заготовка закрепляется на столе станка и движется прямолинейно или криволинейно. Фрезерные станки могут быть как универсальными, так и с ЧПУ



Рис.3.Пример детали для фрезерной обработки

Инструментом для фрезерных станков является фреза. Также могут применяться другие осевые инструменты: сверла, зенкеры, метчики и резьбонарезные головки.

Фрезерный станок состоит из основных узлов. Рассмотрим некоторые из них:

Станина – самая массивная часть станка, на которой смонтированы все остальные узлы станка.

Стол – на нем закрепляется заготовка либо приспособление с заготовкой.

Шпиндель – узел станка, на котором крепится инструмент или оправка с инструментом.

Система ЧПУ – блок управления станком, куда загружается управляющая программа. Он выполняет управление всеми движениями станка.

Фрезерная головка – узел станка, в котором монтируется шпиндель.

Портал (для станков портального типа) – узел, на котором монтируется фрезерная головка. Портал перемещается по оси X.

Колонна (для вертикально-фрезерных станков) – узел, на который монтируется фрезерная головка. По колонне в вертикальном направлении перемещается либо стол, либо фрезерная головка.



Рис.4.Узлы фрезерного станка

Фрезерные станки имеют от 3 до 6 управляемых координат. Причем перемещения может нести на себе как инструмент, так и стол с заготовкой. Инструмент может перемещаться относительно заготовки по трем линейным направлениям и трем угловым. Стол же может перемещаться по двум направлениям (X, Y) и поворачиваться в двух направлениях. Также встречаются конструкции станков, у которых несколько фрезерных головок, в таком случае управляемых координат больше.

Так же широкое применение в современном производстве находят токарно-фрезерные многоцелевые станки (обрабатывающие центры), они представляют собой комбинацию токарного и фрезерного станков и, как правило, используются для обработки деталей со сложными поверхностями. На таких станках возможно изготовление сложнопрофильных деталей с минимальным количеством перезакреплений.

УДК 621.9

АНАЛИЗ ВИДОВ ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА СОВРЕМЕННОГО МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Алексей Андреевич Алексеев,
аспирант (2 год),
кафедра «Резание материалов, металлорежущие станки и инструменты» им. С.С. Силина
Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева

Научный руководитель: Д.И. Волков,
доктор технических наук, профессор кафедры «Резание материалов, металлорежущие станки и инструменты» имени С.С. Силина

Производственное оборудование представляет собой наиболее важную часть основных фондов предприятий, их технико-производственный потенциал, поэтому вопросы использования и сохранения работоспособности оборудования должны быть предметом внимания как руководителей всех звеньев, так и рабочих на предприятии.

Ремонт остаётся важным направлением воспроизводства основных фондов. Поисками рациональных форм и методов технического обслуживания оборудования заняты многие предприятия. Система периодических ремонтов, широко используемая в машиностроении, нормативная часть которой основана на «Единой системе планово-предупредительного ремонта и рациональной эксплуатации технологического оборудования машиностроительных предприятий», подготовленной в 60-х годах Экспериментальным научно-исследовательским институтом металлорежущих станков, становится малоприменима в современных условиях. Это обусловлено появлением нового сложного высокотехнологичного оборудования, для которого проведение ремонтов по заранее разработанным картам, замена определённых деталей и узлов не выработавших свой ресурс, предусмотренных системой планово-предупредительного ремонта (далее по тексту ППР), становится нерациональным и экономически необоснованным.

Эффективность работы ремонтного хозяйства имеет значительное влияние на себестоимость выпускаемой продукции, ее качество и производительность труда на предприятии.

Во всем объеме производственного технологического оборудования наибольшую часть занимает металлорежущее оборудование. Последние 10-15 лет характеризуются значительные темпами роста и развития станкостроения. Металлорежущее оборудование становится все более наукоемким, производительным и точным. В связи с этим возникает

потребность разработки новой систему технического обслуживания и ремонта данного оборудования.

Металлорежущие оборудование является основным видом заводского оборудования, предназначенного для производства деталей всех современных машин и приборов, а также инструментов и других изделий, поэтому количество металлорежущих станков, их технический уровень и состояние в значительной степени характеризует производственную мощность предприятия в целом.

В процессе эксплуатации оборудования отдельные детали, целые узлы и механизмы машин постепенно изнашиваются, правильность взаимодействия их нарушается, вследствие чего, машины разлаживаются, и снижается их производительность. По этому наряду с правильной технической эксплуатацией и тщательным уходом за оборудованием необходим систематический его ремонт. Восстановление его работоспособности и эксплуатационных свойств достигается путем ремонта и уходом за оборудованием.

В современных условиях при высоком уровне механизации производственных процессов производительность труда в промышленности и качество выпускаемой продукции в большой степени зависят от состояния технологического оборудования, а, следовательно, от организации и техники ремонта.

При неудовлетворительной организации ремонта и низком качестве ремонтных работ потери в производстве только от простоя оборудования, от неисправности и выполнения ремонтных работ могут существенно сказываться на экономике предприятия. Иногда они достигают 12-15% всех простоев оборудования и 10-25% всех внутрисменных простоев. Таким образом, в современных условиях ремонт оборудования оказывает большое влияние на экономику предприятия и экономику всего промышленного производства. Это влияние становилось все более очевидным с увеличением в составе парка технологического оборудования высокопроизводительных автоматизированных станков.

Сущность ремонта заключается в сохранении и качественном восстановлении работоспособности оборудования путем замены или восстановления изношенных деталей и регулировки механизмов.

В машиностроении затраты на ремонт оборудования ежегодно достигают 17-26% его первоначальной стоимости, что соответствует 5-8% себестоимости продукции завода. В результате механизации процессов производства, увеличения парка технологического оборудования и возрастающей его сложности и точности, затраты на ремонт и техническое обслуживание оборудования постоянно увеличиваются.

Ремонтное хозяйство создается на предприятии для того, чтобы обеспечить с минимальными затратами рациональную эксплуатацию его основных производственных фондов. Децентрализация ремонта приводит к параллельности однородных работ и низкому техническому уровню их исполнения. Затраты на капитальный ремонт станка иногда превышают стоимость нового, а простои станков в ремонте, как правило превышают плановые.

В связи с этим задачи организации ремонта оборудования становятся наиболее актуальными. Основной задачей ремонтного хозяйства является обеспечение бесперебойной эксплуатации оборудования при минимальных затратах на ремонт и техническое обслуживание.

Система ППР в России.

Система ППР, широко используемая в машиностроении, основывается на «Единой системе планово-предупредительного ремонта и рациональной эксплуатации технологического оборудования машиностроительных предприятий», разработанной в 60-х годах ЭНИМСом (экспериментальный научно-исследовательский институт металлорежущих станков). Согласно данной системы под планово-предупредительным ремонтом следует понимать восстановление работоспособности машин (точности,

мощности и производительности) путем технического обслуживания, замены и ремонта изношенных деталей и узлов, проводимых по заранее составленному плану.

Системой планово-предупредительного ремонта предусматривается после отработки каждым агрегатом заданного периода времени проведение профилактических осмотров и плановых ремонтов.

Чередование и периодичность осмотром и плановых ремонтов оборудования определяются его особенностями, назначением, габаритами и условиями эксплуатации.

Ремонт – комплекс операций по восстановлению исправности и работоспособности изделий и восстановлению ресурсов изделий или их составных частей [1].

Согласно системы ППР ремонтные работы делятся на следующие виды:

Малый ремонт – вид планового ремонта, при котором заменой или восстановлением изношенных деталей и регулированием механизмов обеспечивается нормальная эксплуатация агрегата до очередного планового ремонта [2].

Средний ремонт – вид планового ремонта, при котором производится частичная разборка агрегата, капитальный ремонт отдельных узлов, замена и восстановление основных изношенных деталей, сборка, регулирование и испытание под нагрузкой [2].

Капитальный ремонт – комплекс работ, включающий полную разборку агрегата, замену всех изношенных деталей и узлов, ремонт базовых и других деталей и узлов, сборку, регулирование и испытание агрегата под нагрузкой [2].

Внеплановый ремонт – вид ремонта, вызванный аварией оборудования или не предусмотренный годовым планом ремонта.

Плановый ремонт выполняется с периодичностью и в объеме, установленными в эксплуатационной документации, независимо от технического состояния оборудования в момент начала ремонта.

Структура межремонтного цикла представляет собой перечень и последовательность выполнения ремонтных работ и работ по техническому уходу в период между капитальными ремонтами или между вводом в эксплуатацию и первым капитальным ремонтом. Для металлорежущих станков в зависимости от размеров и массы количество ремонтных работ и работ по техническому уходу в межремонтный цикл варьируется для средних ремонтов от 1 до 2, для малых от 4 до 9, для осмотров от 6 до 36.

Очередность выполнения ремонтов может быть представлена схемой для металлорежущих станков весом до 10 тонн:

К – О – М – О – М – О – С – О – М – О – М – О – К,

где К – капитальный ремонт; С – средний ремонт; М – малый ремонт; О – осмотр.

Система ППР предусматривает применительно к различным видам оборудования и условиям его эксплуатации разную продолжительность межремонтных циклов, межремонтных и межосмотровых периодов.

Межремонтное обслуживание включает в себя наблюдение за выполнение правил эксплуатации оборудования, указанных в технических руководствах заводов-изготовителей, особенно механизмов управления, ограждений и смазочных устройств, а также своевременное устранение мелких неисправностей и регулирование механизмов. Межремонтное обслуживание выполняют рабочие, обслуживающие агрегаты, и дежурный персонал ремонтной службы цеха.

Проверка геометрической точности производится после плановых ремонтов и профилактически по особому плану-графику для прецизионного и финишного оборудования, а также некоторого оборудования, встроенного в автоматические линии. Проверку на геометрическую точность агрегатов проводят в соответствии с нормами, предусмотренными государственными стандартами или техническими условиями.

Проверка жесткости производится после плановых ремонтов (капитального и среднего).

Осмотры производятся с целью проверки состояния оборудования, устранения мелких неисправностей и выявления объема подготовительных работ, подлежащих выполнению при очередном плановом ремонте.

Продолжительность межремонтного цикла, межремонтного и межосмотрового периодов в отработанных часах установлена для каждой группы оборудования в зависимости от типа оборудования, условий и характера работы. Учет ведется по количеству отработанных оборудованием часов или смен или какой-либо эквивалентной величине, характеризующих число рабочих циклов машины.

Степень сложности ремонта агрегата, его ремонтные особенности оцениваются категориями сложности ремонта. Категория сложности ремонта оборудования зависит от его конструктивных и технологических особенностей. Исходными данными для установления категорий сложности ремонта оборудования являются технические характеристики, содержащиеся в паспортах.

Для оценки ремонтных особенностей металлорежущего, деревообрабатывающего, кузнечно-прессового, литейного, подъемно-транспортного оборудования за эталон принята ремонтная сложность токарно-винторезного станка 1К62 с наибольшим диаметром обрабатываемого изделия 400 мм и расстоянием между центрами 1000 мм. Агрегату-эталону присвоена 11-я категория сложности ремонта.

Для планирования и учета ремонтных работ, расчетов, наряду с «категорией сложности ремонта», вводится понятие «Ремонтная единица». Для отдельного агрегата категория сложности ремонта и соответствующее этому агрегату число ремонтных единиц совпадают.

При планово - предупредительном ремонте осуществляется обязательное планирование всех работ по техническому обслуживанию и ремонту оборудования.

Годовой план ремонта оборудования предприятия составляется отделом главного механика предприятия на основании установленных положением межремонтных периодов с учетом отработанных часов или смен за период от последнего планового ремонта каждого агрегата.

При планово-предупредительном ремонте осуществляется обязательная технологическая, материальная и организационная подготовка работ по техническому уходу и ремонту оборудования.

Технологическая подготовка заключается в составлении типовых технологических процессов сборки, разборки агрегатов и изготовлении наиболее трудоемких и сложных деталей, а также составлении дефектной ведомости.

Подготовка ремонтных работ предусматривает своевременное получение или изготовление запасных деталей и узлов, заменяющих изношенные, снабжение инструментами и приспособлениями, а так же материалами и покупными комплектующими изделиями.

В передовых промышленно развитых странах система организации ремонтно-профилактических работ называется несколько иначе, а именно [3]:

система обслуживания – в Европе, США (Соединенные Штаты Америки), Канаде и др.;

система сохранения – в Японии, Южной Корее и других азиатских странах.

В основном на предприятиях нет специальных подразделений по ремонту, например, отделов главного механика, главного энергетика и др.. Такие службы возглавляет на основе принципа единоначалия технический руководитель фирмы по оборудованию, а работами руководят непосредственно мастера (механики).

Порядок выполнения и содержание работ по техническому обслуживанию и ремонту разрабатывается заводами – изготовителями оборудования. Этот порядок определяется в инструкциях по эксплуатации соответствующих станков и неукоснительно выполняется на производственных предприятиях.

Существенная особенность ремонтного производства заключается в том, что практически не применяется ремонт с полной разборкой оборудования. Как текущий, так и капитальный ремонты выполняются путем замены пришедших в негодность агрегатов, узлов и деталей на годные заводского изготовления. Ремонтно-механические цеха по изготовлению и восстановлению деталей отсутствуют.

В США существует система планово-предупредительного обслуживания основных фондов, которая предусматривает содержание основных фондов в работоспособном состоянии путем замены любого сменного элемента, если есть опасность выхода оборудования из строя [3].

Как правило, на машиностроительных заводах США планово-предупредительным ремонтом охватывается не все оборудование, а только наиболее важное для производства, высокопроизводительное, загруженное. При этом область применения планово-предупредительного ремонта на предприятиях непостоянна, а подвержена изменениям, вызванным главным образом изменениями в загрузке оборудования. Перечень оборудования, подлежащего планово-предупредительному ремонту, на предприятиях периодически пересматривается и уточняется с учетом перемен, происходящих в загрузке отдельных станков и в их значении для производства.

Оборудование, имеющее дублеров, не полностью использующееся и не играющее важной роли в производственном процессе, охватывать планово-предупредительные ремонтом считается экономически невыгодным. Ремонт такого оборудования производится по мере необходимости, по заявкам цехов. На некоторых предприятиях для малозагруженных станков, не являющихся узким местом в производстве, считают наиболее экономически выгодным следующий простой способ поддержания их работоспособности и технического состояния: к группам таких станков прикрепляют высококвалифицированных ремонтных рабочих, которые раз в неделю осматривают эти станки, выясняют их состояние у станочников и устраняют обнаруженные дефекты.

Применяющаяся на большинстве предприятий США для ведущего оборудования система ППР, получившая название системы планово-предупредительного обслуживания, предусматривает выполнение в заранее установленные сроки комплекса работ, соответствующего нашему текущему (малому) ремонту и осмотру, т. е. складывающегося из необходимых ремонтных работ и приуроченных к этому времени работ по техническому обслуживанию. Эти работы выполняются в объеме, исключающем выход станка из строя в течение достаточно длительного времени. Планово-предупредительного капитального ремонта система не предусматривает. Этот вид ремонта производят по мере необходимости.

Система не содержит каких-либо типовых нормативов длительности периодов, через которые должно выполняться плановое обслуживание и ремонт или, по нашей терминологии, длительности межремонтных периодов. Они устанавливаются на предприятиях индивидуально для каждой единицы оборудования на основе анализа статистических данных об отказах и ремонтах или назначаются мастером исходя из рекомендаций фирмы изготовителя, производственных соображений (точность обработки, значимость для предприятия и т. п.) и опыта работы с аналогичным оборудованием, как, например, на предприятии «McDonnell Aircraft Corporation». Но на отдельных предприятиях для некоторого оборудования существуют регламентированные периоды ремонта и обслуживания. Так, на предприятиях одной из американских компаний было принято все шлифовальные станки подвергаются осмотру один раз в девять месяцев, при котором пришабривались направляющие, а токарные автоматы и бесцентровые станки, работающие в три смены на точных работах, проходили профилактический осмотр, при котором заменялись изношенные детали и производилось шабрение направляющих, один раз в год. На предприятиях той же компании, на участках, выпускающих продукцию высокой точности, у внутришлифовальных станков один раз в полгода производилась замена шпинделей, шабрение направляющих и выполнялись другие необходимые работы.

При назначении длительности периодов, через которые должно производиться ремонта и обслуживание, исходят из допустимости выполнения части ремонтных работ в неплановом порядке. Допускаемые соотношения между объемами плановых и неплановых (включая аварийные) работ зависят от степени важности оборудования для производства и его загруженности. Некоторые предприятия считают экономически оправданными неплановые ремонтные работы в объеме 40% и даже больше от общего объема работ по ремонту и обслуживанию оборудования. Но на отдельных заводах массового производства они составляют около 10%.

Календарные графики планового ремонта и обслуживания оборудования на ряде предприятий разрабатываются не на основе принятых межремонтных периодов, а на основе статистических данных за прошлые годы и осмотров оборудования. При составлении графиков сроки выполнения работ приурочиваются, по возможности, ко времени наименьшей загрузки оборудования.

Система не предусматривает и определенных объемов планового ремонта и обслуживания. В результате отсутствия таких нормативов определение потребности оборудования в работах по ремонту и техническому обслуживанию базируется в основном на статистических данных за предыдущие периоды, а нормирование ремонтных работ производится на основе поэлементных норм.

Достаточно высокая эффективность применения такой организации ремонта оборудования на заводах США достигается благодаря хорошо поставленному учету выполнения ремонтных работ, широкому использованию электронно-вычислительной техники для анализа статистических данных, планирования и выдачи нарядов на ремонтные работы, хорошо организованной диспетчерской службе, возможности быстрого получения запасных частей, необходимых для ремонта, высокой квалификации ремонтного персонала и выполнения основной части ремонтных работ в выходные дни и в третью смену.

В дальнейшем в США на ряде предприятий стали применять регламентированные межремонтные периоды в виде контрольных сроков выполнения ремонтов с допускаемыми от них отклонениями. Они устанавливаются на основе анализа и обработки статистических данных об отказах оборудования и о повторяющихся ремонтных работах, а также исходя из сроков службы деталей. Каждый ремонт, выполненный вне этих контрольных сроков, подвергается специальному анализу.

В США постоянно велись и ведутся исследовательские работы, целью которых является создать основу для разработки научно обоснованных программ планово-предупредительного ремонта и обслуживания. В них используются общие положения теории вероятности, в частности, теории массового обслуживания, а также результаты анализа затрат, связанных с ремонтом и обслуживанием оборудования. Большинство этих работ предусматривает установление межремонтных периодов исходя из распределения частоты отказов оборудования.

Предприятия-изготовители резервируют до 25 % своих производственных мощностей с целью своевременного обеспечения возможности восстановления оборудования путем замены отдельных агрегатов, узлов и деталей. В США изготовление запасных частей поощряется тем, что их разрешается продавать на 20–25 % дороже, чем в виде собранного оборудования.

В США доля выполнения ремонтных работ силами специализированных ремонтных фирм не превышает 10 % всего объема ремонтов в стране. Преимущественно это наладка, испытания, модернизация, сложные регулировочные работы.

Как это следует из приведенного, организация планово-предупредительного ремонта оборудования в США имеет достаточную гибкость и основывается прежде всего на экономических соображениях и расчетах. Она различна на разных предприятиях и может видоизменяться на одном и том же заводе при изменении его загрузки.

В таких странах как Япония и Южная Корея считается, что для значительного увеличения прибыли от эксплуатации оборудования необходимо, чтобы ремонт и восстановление оборудования носило ритмичный характер. В японской системе обеспечения сохранности оборудования заложен следующий принцип: все работы по замене агрегатов, узлов и деталей самой сложной машины по возможности следует производить на месте ее установки силами собственного специально подготовленного персонала.

Система всеобщего ухода за оборудованием TPM (Total Productive Maintenance - TPM) была разработана в начале 70-х годов в Японии, в рамках производственной системы фирмы «Toyota». Необходимость в создании такой системы возникла из-за огромных потерь, вызываемых простоем технологического оборудования.

Начиная с 80-годов TPM была успешно внедрена во многих японских компаниях, компаниях США и Западной Европы. В последние годы систему TPM начали внедрять ряд российских компаний.

В философии TPM центральное место отводится человеку. Лишь радикальное изменение трудового поведения работников, возникновение у них стремления к совершенствованию производства позволит успешно внедрить в компании систему TPM. Изменение трудового поведения работников осуществляется при помощи их активного участия в функционировании TPM, расширении их функций, повышения квалификации, роста мастерства, а также совершенствования системы мотивации в компании.

Система TPM охватывает основные виды деятельности компании – проектирование, производство и управление система TPM. Все мероприятия, осуществляемые в рамках TPM, направлены на устранение основных видов потерь, снижающих эффективность компании. Такими потерями являются:

- потери времени функционирования оборудования (потери, вызванные поломками оборудования; потери из-за наладки оборудования);
- потери энергоресурсов, сырья, материалов;
- потери рабочего времени.

Ключевым направлением развертывания системы TPM является самостоятельное обслуживание оборудования оператором. При традиционных методах организации производства оператор занимается изготовлением продукции, а обслуживание оборудования осуществляют наладчики, механики-ремонтники, то есть функционально эти два вида деятельности разграничены. При этом ремонты оборудования носят планово-предупредительный характер, а действительная потребность в ремонте не учитывается. Наладчики не успевают выполнять все увеличивающийся объем работы. Все это ведет к увеличению времени простоя оборудования и увеличению затрат на поддержание оборудования в рабочем состоянии. Самостоятельное обслуживание оборудования в системе TPM - это такой порядок работы, при котором оператор, помимо выпуска продукции, осуществляет чистку, смазку, проверку и затяжку соединений, устранение мелких неисправностей и т.д. закрепленного за ним оборудования.

Процесс освоения самостоятельного обслуживания оборудования операторами состоит из ряда шагов, направленных на то, чтобы они научились выполнять базовое техническое обслуживание (или ремонт) оборудования и приобрели навыки выявления его дефектов до того, как они приведут к поломке или выпуску брака. Без системы TPM производственная система фирмы «Toyota», возможно, не смогла бы развиться. Это подтверждается тем, что смежники фирмы «Toyota» динамично осваивают систему TPM [4].

Большинство предприятий ведет борьбу со спорадическими потерями, появляющийся от случая к случаю, тогда как хронические потери остаются без внимания. Внедрение системы TPM (рис.1) направлено на устранение хронических потерь.

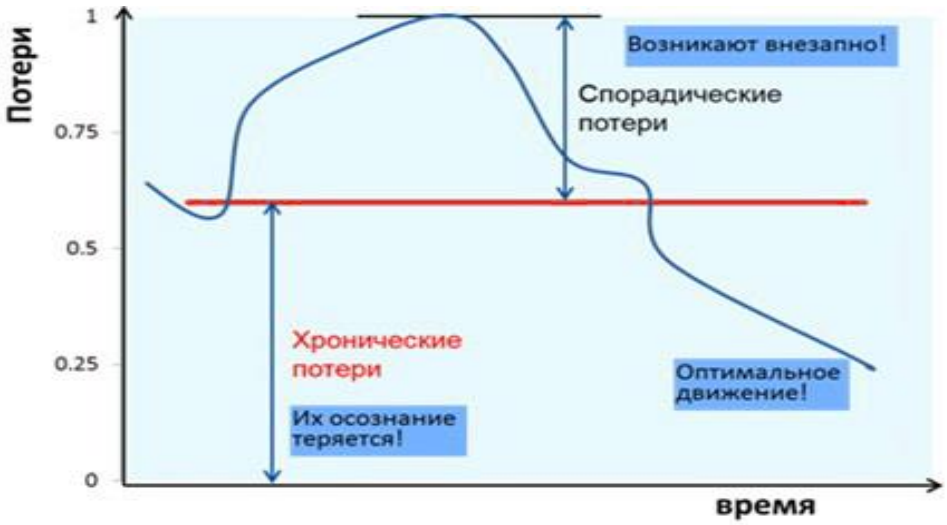


Рис.1. Устранение хронических потерь при применении системы TPM

При переходе на самостоятельное обслуживание оборудования первым шагом является обучение операторов способам и видам обслуживания оборудования. Далее, для всех типов оборудования, которые переводятся на самостоятельное обслуживание, определяются виды и периодичность работ по обслуживанию и мелким ремонтам, передаваемым операторам. По этим работам разрабатываются и размещаются на рабочих местах наглядные карты, схемы, инструкции. Для выполнения этих работ оператор оснащается необходимым инструментом и материалами.

Следующее направление, связанное с внедрением TPM – обеспечение управления оборудованием на протяжении его жизненного цикла. В этих целях, с учетом перехода на самостоятельное обслуживание оборудования оператором, переосмысливаются задачи планово-предупредительного ремонта и технического обслуживания оборудования. Обновленные (сокращенные, но обладающие более высокой квалификацией) ремонтные службы предназначаются для ведения среднего и капитального ремонта, модернизации оборудования, а также для устранения серьезных аварий. Усиливается информационное обеспечение, предполагающее консолидацию технической документации, компьютерный учет и анализ всех видов простоев оборудования и их причин.

Третьим важным направлением развертывания системы TPM является проведение отдельных улучшений, косвенно связанных с обслуживанием оборудования. Отдельные улучшения представляют собой постоянный процесс совершенствования различных элементов производства (использование человеческих ресурсов, использование помещений, расход энергоресурсов, расход сырья и материалов, работа с потребителями, подрядчиками и поставщиками и др.).

На предприятиях Австралии и Новой Зеландии, где производственная культура довольно сильно отличается от производственной культуры предприятий Японии, разработана TPM 3 (улучшенная и расширенная австралийская версия третьего поколения системы TPM). Для этого потребовалось расширить область отдельных улучшений таким образом, что теперь она охватывает как само оборудование, так и процессы на макроуровне, когда рассматривают все производство с целью установления причин потерь и планирования бюджета времени для улучшений, и на микроуровне, когда оценивают величину отдельных видов потерь для решения сложных проблем. В систему TPM 3 введены дополнительные направления деятельности по формированию производственной среды и улучшению системы управления персоналом, чтобы отразить потребность в переходе от деятельности по аналогии к последовательным улучшениям, которые являются фундаментом TPM [4].

Во всех зарубежных странах большое внимание уделяется нормированию затрат труда, времени остановки на восстановление работоспособности машин и времени

плановой замены сменных элементов. Снижение издержек на восстановление неисправных основных фондов – это необходимое условие эффективной работы на конкурентном рынке.

Таким образом для совершенствование системы технического обслуживания и ремонта современного металлорежущего оборудования необходимо:

- выделить наиболее важное для производства, высокопроизводительное, загруженное оборудование для проведения систематического контроля состояния и проведения технического обслуживания и ремонта;
- сформировать оптимальный по содержанию и периодичности перечень работ по техническому обслуживанию и ремонту современного металлорежущего оборудования;
- проведение постоянного сбора и анализа статистических данных об отказах и ремонтах оборудования;
- применять различные стратегии, формы и методы технического обслуживания и ремонта с целью увеличения гибкости системы;
- использовать новые средства и методы технической диагностики;
- оптимально использовать возможности и преимущества агрегатно-узлового метода ремонта;
- вовлечение операторов (производственных рабочих) в процесс технического обслуживания и ремонта оборудования.

Литература

1. *ГОСТ 18322-78* Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения.
2. *Якобсон М.О.* Единая система планово-предупредительного ремонта и рациональной эксплуатации технологического оборудования машиностроительных предприятий: Под редакцией М.О. Якобсон. - 6-е изд., перераб. и доп.- М.: «Машиностроение». 1967. - 592с.
3. *Ящура А.И.* Система технического обслуживания м ремонта общепромышленного оборудования: Справочник. – М.: «Издательство НЦ ЭНАС». 2006. – 360 с. ил.
4. http://www.tpm-centre.ru/page.php?pageId=25&menuItemTreeCode=0108 - Р. Кеннеди, Л. Маца: Взаимодействие 5S и TPM в системе TPM 3.
5. *Борисов Ю.С.* Организация ремонта и технического обслуживания оборудования - М., «Машиностроение». 1978. – 360с.

УДК 621.9

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ СТЫКОВ ПРИ ТЕРМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Михаил Сергеевич Куц,
студент 4 курса,
кафедра «Металлорежущие станки и оборудование»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Б.М. Дмитриев,
доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки и оборудование»

Металлорежущий станок – сложная термо-механическая система. Во время работы он подвергается не только механическому воздействию, но и также тепловому. Под

воздействием тепла происходят тепловые деформации несущей системы станка,что ведет к возникновению погрешностей обработки[1].

В тоже время в несущей системе станка присутствует большое количество стыков. На данный момент существует множество работ[2] посвященных контактной податливости, позволяющие учитывать стык при расчете несущей системы на жесткость. В тоже время существует достаточно работ[3] посвященных влиянию стыка на тепловые процессы. Однако все они находят применение в области энергетических установок, теплообменников и т.д., где объектом исследования является непосредственно тепло, и необходимо иметь информацию о температурном поле для повышения качества их работы. В станке же важно не столько само тепловое поле, сколько то влияние которое оно оказывает на несущую систему- деформации под воздействием тепла. Поэтому целью данной работы было применение знаний о влиянии стыка на тепло при расчете деформаций системы.

Как известно[4] стык препятствует прохождению тепла, обладая термическим сопротивлением. Рассмотрим задачу о стержне: к торцу медного стержня с известной геометрией подведен источник тепла (рис. 1). Необходимо определить удлинение стержня после достижения равновесного термического состояния, в случаях если стержень целый и составной.

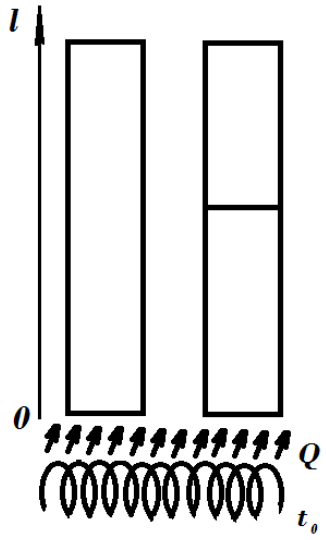


Рис.1 Схема нагрева.

Как известно из курса сопротивления материалов тепловые деформации в случае одномерного стержня равны

$$\frac{du}{dl} = \alpha \Delta T \quad (1)$$

,где -коэффициент линейного теплового расширения, u-удлинение, ΔT-разница температур до и после нагрева.

В общем случае, когда температура стержня не однородна, а представляет собой некоторую функцию $\Delta T = \Delta T(l)$ полные удлинения стержня можно найти проинтегрировав (1):

$$u = \alpha \int_0^L \Delta T(l) dl \quad (2)$$

В таком случае проблема состоит в определении зависимости $\Delta T(l)$.

К одному из торцев стержня подводят источник тепла температуры t_1 имеющим тепловой поток Q. После достижения теплового равновесия распределение температуры по длине сплошного стержня будет иметь вид:

$$t(l) = t_1 - rQl \quad (3)$$

,где r- удельное термическое сопротивление стержня.

Распределение температуры составного стержня имеет вид:

$$\begin{cases} t(l) = t_1 - rQl, & \text{при } l < L_{\text{стк}} \\ t(l) = t_1 - rQl - RQ, & \text{при } l > L_{\text{стк}} \end{cases} \quad (4)$$

,где R- термическое сопротивление стыка.

Зная распределение температуры по стержню, а соответственно и распределение $\Delta T(l)$ можно найти удлинения стержней. Для сплошного стержня удлинение равно:

$$u = \alpha \int_0^L (t_1 - rQl - t_0)dl = aL(t_1 - \frac{rQl}{2} - t_0) \quad (5)$$

Для составного стержня удлинение равно:

$$u = \alpha \left(\int_0^{L_{\text{стк}}} (t_1 - rQl - t_0)dl + \int_{L_{\text{стк}}}^L (t_1 - rQl - RQ - t_0)dl \right) = a \left(\int_0^L (t_1 - rQl - t_0)dl - \int_{L_{\text{стк}}}^L RQdl \right) = aL(t_1 - \frac{rQl}{2} - t_0) - aR(L - L_{\text{стк}}) \quad (6)$$

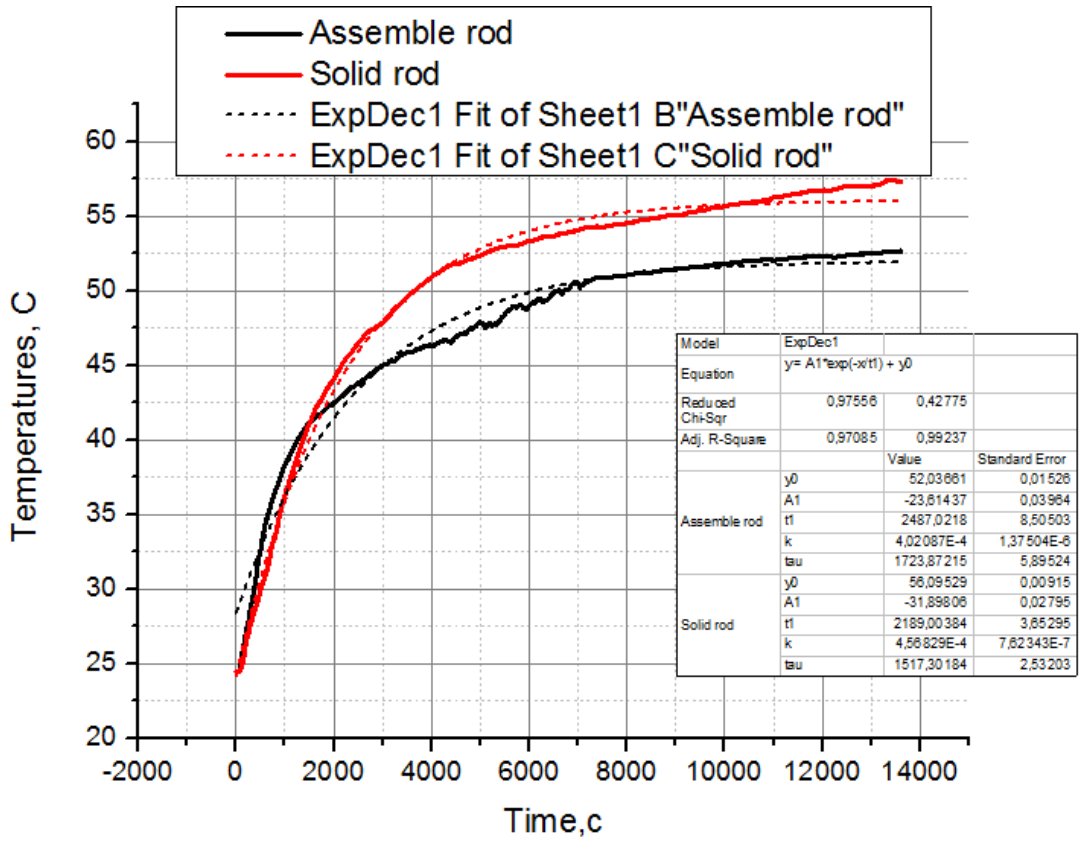
Таким образом удлинение составного стержня меньше удлинения сплошного на величину $\Delta u = aR(L - L_{\text{стк}})$, которая зависит от термического сопротивления стыка и его расположения в стержне.

Для подтверждения данного решения был поставлен эксперимент- два стержня с одинаковой геометрией, один из которых составной, а другой сплошной, погружены в масло. Нагрев производится с помощью спирали. Для сбора данных об удлинениях и температурах используется АСИ[5]. Ниже приведены полученные экспериментальные данные.

Таблица 1. Результаты экспериментов.

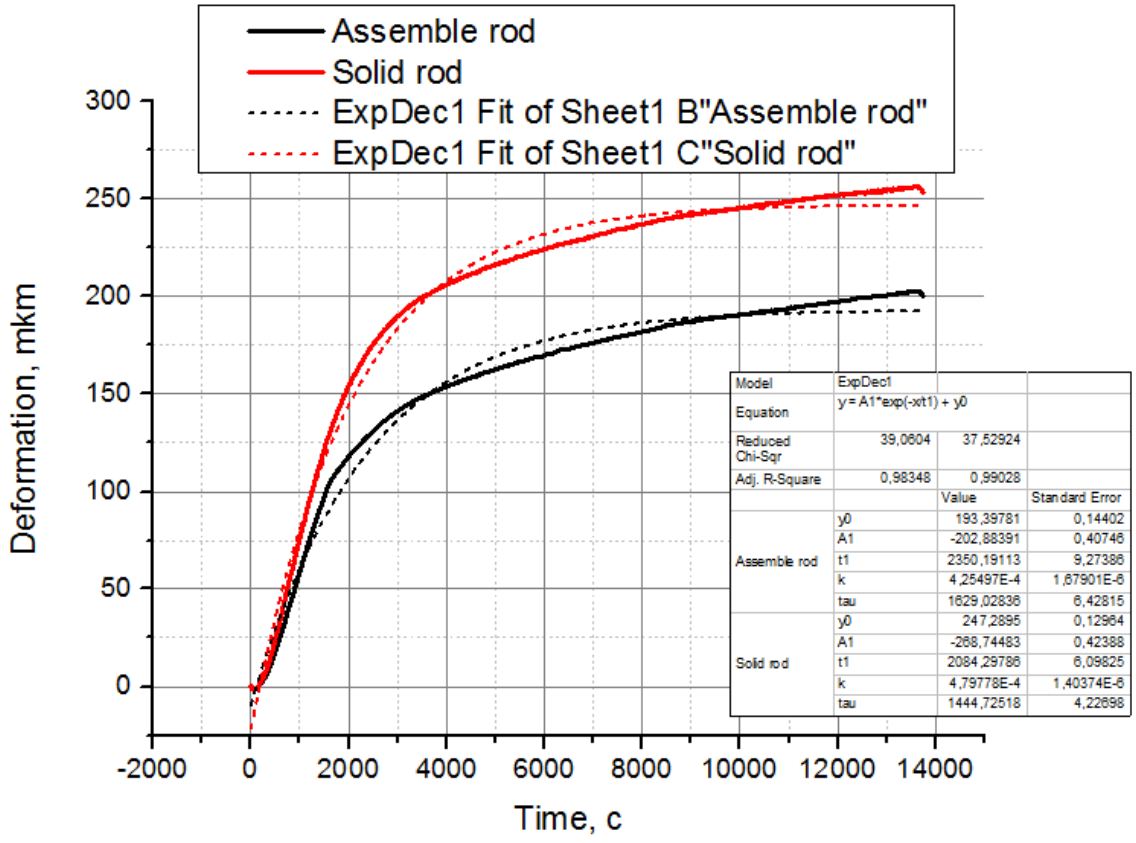
№ п/п	Дата проведения	Напряжение	Максимальное значение удлинения, мкм		Максимальное значение температуры, °С		Сила затяжки Н*м
			Целый стержень	Стержень со стыками	Целый стержень	Стержень со стыками	
1	30.01.2014	120	246,92	192,81	56,032	51,938	0,51
2	31.01.2014	50	58,638	28,816	32,681	31,504	0,51
3	03.02.2014	80	143,85	70,782	41,449	40,324	0,51

На графиках ниже представлено изменение удлинений и температуры стержней с течением времени.



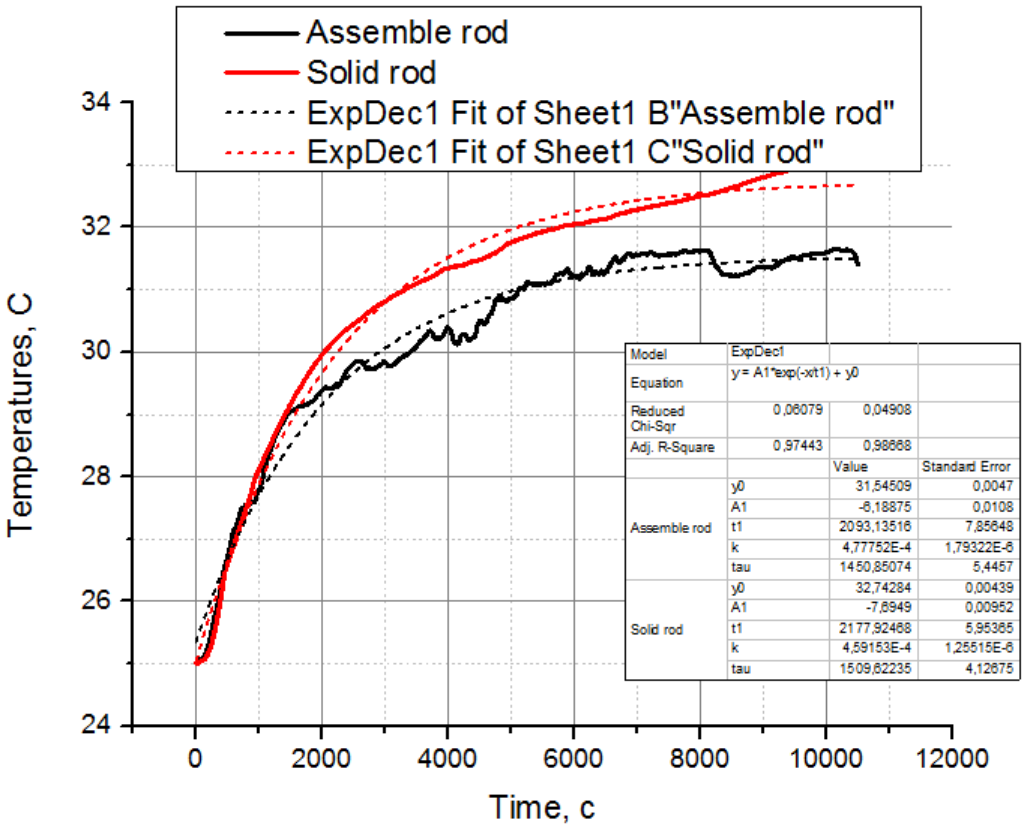
Model	ExpDec1		
Equation	y= A1*exp(-x/t1) + y0		
Reduced Chi-Sqr	0,97556	0,42775	
Adj. R-Square	0,97085	0,99237	
		Value	Standard Error
Assemble rod	y0	52,03661	0,01526
	A1	-23,81437	0,03964
	t1	2487,0218	8,50503
	k	4,02087E-4	1,37504E-6
	tau	1723,87215	5,89524
Solid rod	y0	56,09529	0,00915
	A1	-31,89806	0,02795
	t1	2189,00384	3,65295
	k	4,56829E-4	7,62343E-7
	tau	1517,30184	2,53203

Рис.2. График изменения температуры при напряжение нагревателя 120В.



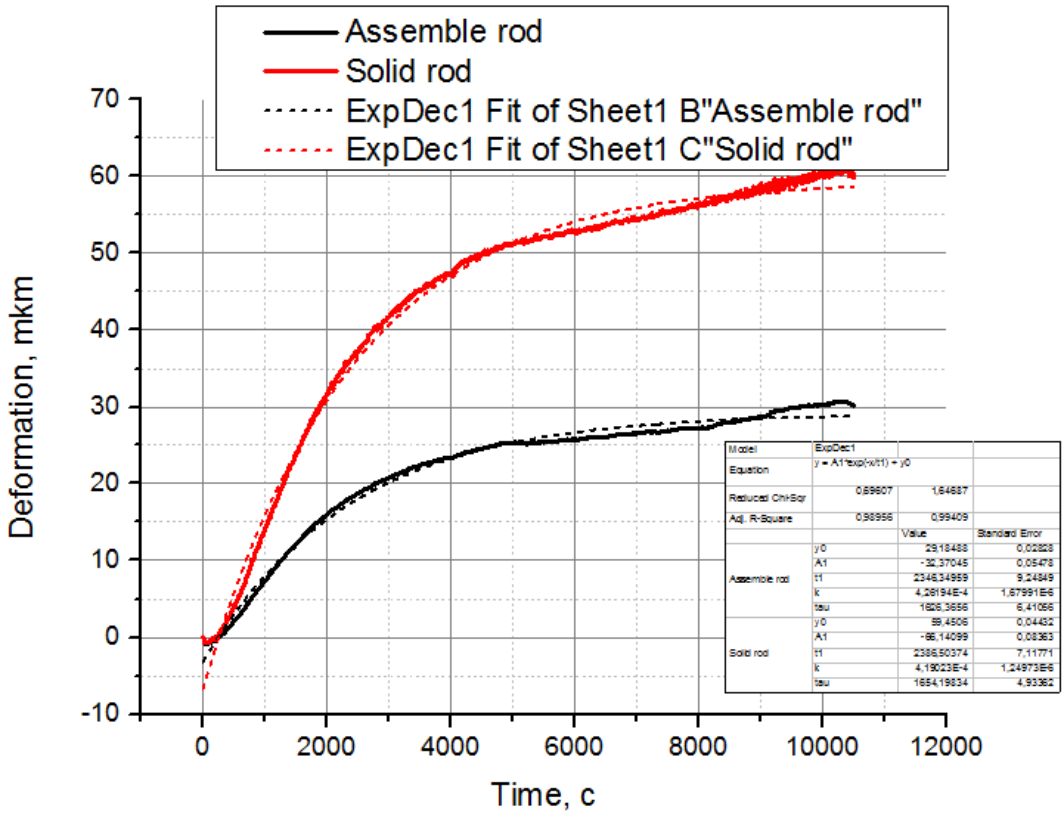
Model	ExpDec1		
Equation	y= A1*exp(-x/t1) + y0		
Reduced Chi-Sqr	39,0604	37,52924	
Adj. R-Square	0,98348	0,99028	
		Value	Standard Error
Assemble rod	y0	193,39781	0,14402
	A1	-202,88391	0,40746
	t1	2350,19113	9,27386
	k	4,25497E-4	1,67901E-6
	tau	1629,02836	6,42815
Solid rod	y0	247,2895	0,12964
	A1	-268,74483	0,42388
	t1	2084,29786	6,09825
	k	4,79778E-4	1,40374E-6
	tau	1444,72518	4,22698

Рис.3. График измениеня деформации при напряжение нагревателя 120В.



Model	ExpDec1		
Equation	y= A1*exp(-x/t1) + y0		
Reduced Chi-Sqr	0,06079	0,04908	
Adj. R-Square	0,97443	0,98668	
		Value	Standard Error
Assemble rod	y0	31,54509	0,0047
	A1	-6,18875	0,0108
	t1	2093,13516	7,85648
	k	4,77752E-4	1,79322E-6
	tau	1450,85074	5,4457
Solid rod	y0	32,74284	0,00439
	A1	-7,6949	0,00952
	t1	2177,92468	5,95365
	k	4,59153E-4	1,25515E-6
	tau	1509,62235	4,12675

Рис.4. График изменения температуры при напряжение нагревателя 50В.



Model	ExpDec1		
Equation	y = A1*exp(-x/t1) + y0		
Reduced Chi-Sqr	0,89607	1,64687	
Adj. R-Square	0,98956	0,99409	
		Value	Standard Error
Assemble rod	y0	29,18488	0,02828
	A1	-32,37045	0,05478
	t1	2346,34969	9,24849
	k	4,26194E-4	1,67991E-6
	tau	1626,3656	6,41056
Solid rod	y0	99,4506	0,04432
	A1	-86,14099	0,08363
	t1	2386,50374	7,11771
	k	4,19023E-4	1,24973E-6
	tau	1654,19834	4,93362

Рис.5. График изменения деформации при напряжение нагревателя 50В.

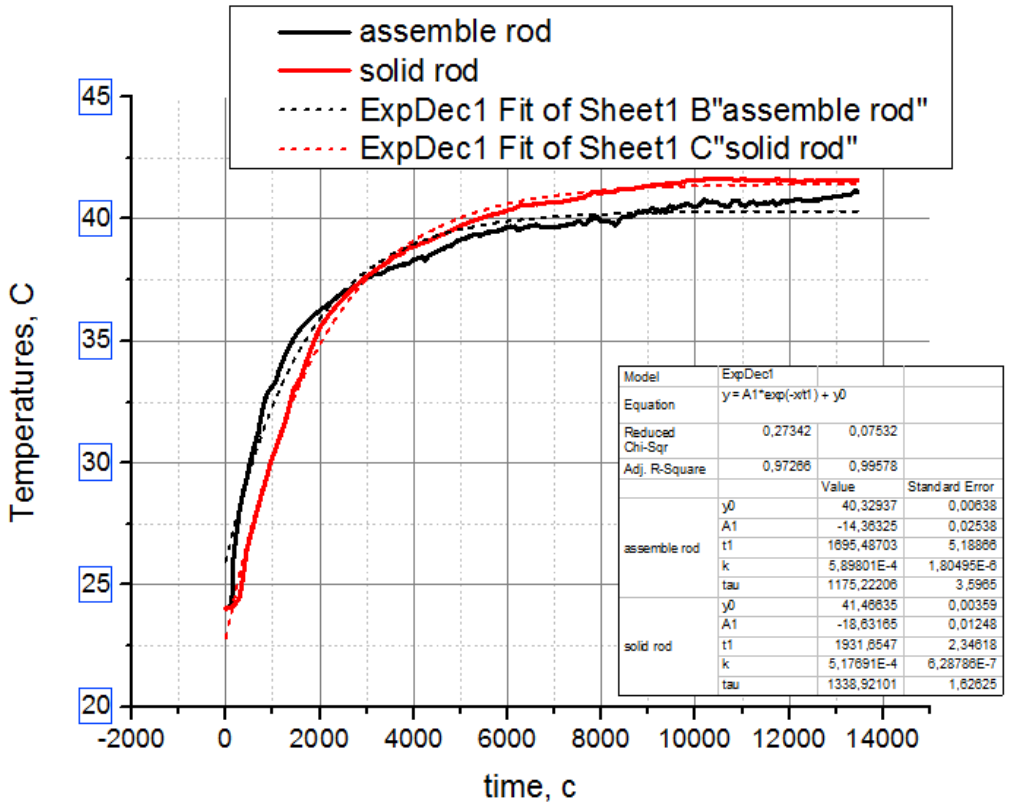


Рис.6. График изменения температуры при напряжение нагревателя 80В.

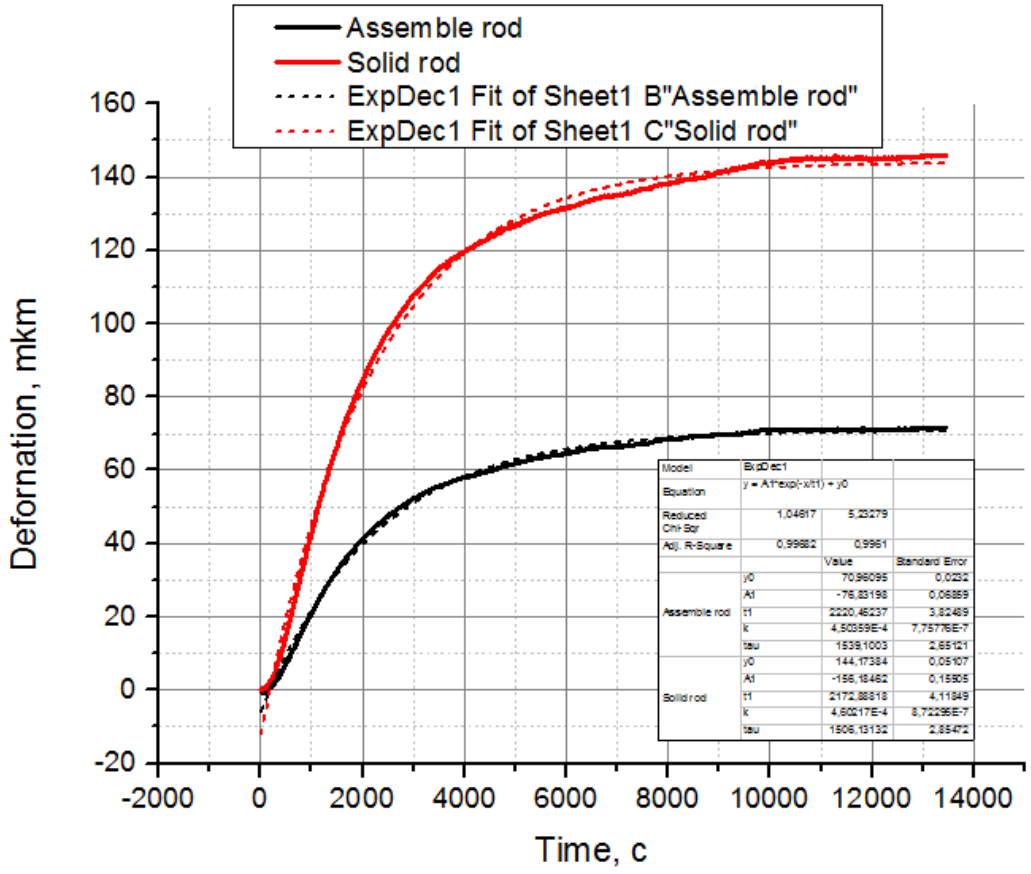


Рис.7. График измениня деформации при напряжение нагревателя 80В.

Выводы:

В данной работе представлен расчет тепловых деформаций на примере задачи о медном стержне с учетом влияния оказываемом стыком. Проведенные эксперименты подтверждают влияние стыка на тепловые деформации. В дальнейшем планируется более подробно исследовать влияние стыков на термические деформации при различном давлении контакта, а также выработка конструкторских рекомендаций по обеспечению наиболее эффективного стыка в несущей системе станка.

Литература

1. Реакция несущей системы станка на термические воздействия / Дмитриев Б. М. // Известия ВУЗов. Сер. "Машиностроение". - 2013. - № 10. - С. 75 - 78.
2. Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей машин: Межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. Н.Б. Демкина. Тверь: ТГТУ, 2005. 132 с.
3. Современный взгляд на проблемы теплового контактирования твёрдых тел / Меснянкин С. Ю., Викулов А. Г., Викулов Д. Г. - УФН 179 945–970 (2009)
4. Контактное термическое сопротивление. / Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н.– М.: Энергия, 1977. – 328 с.
5. Автоматизированная измерительная система для исследования термического состояния станка / Куц М.С. /Сборник трудов конференции «Будущее машиностроения России 2013», с.4-5.

Секция II

Инструментальная техника и технологии

Председатель: **Древаль Алексей Евгеньевич**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инструментальная техника и технологии» (МТ-2)

Ученый секретарь: **Литвиненко Анатолий Владимирович**
кандидат технических наук, доцент кафедры МТ-2

УДК 536.248.2

ВЛИЯНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА НА ФОРМУ КАНАЛОВ КАППИЛЯРНО-ПОРИСТЫХ СТУРКУР ТЕПЛОВЫХ ТРУБ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ ДЕФОРМИРУЮЩЕГО РЕЗАНИЯ

Сергей Александрович Войнов,
студент 5 курса,
кафедра «Инструментальная техника и технологии»
Московский государственный университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Н.Н. Зубков
профессор кафедры «инструментальная техника и технологии»

Потребность в недорогих и надежных устройствах испытывает машиностроение для сброса тепла, охлаждения и нагрева объектов, трансформации плотности теплового потока, термостабилизации, терморегулирования, передачи и преобразования видов энергии. В последнее время особый интерес, в качестве эффективных передающих устройств для передачи тепловой энергии на расстояние, привлекают к себе тепловые трубы (ТТ), принципиальная схема которой представлена на рис.1, которая представляет собой герметичный корпус 1 с капиллярно-пористой структурой (КПС) 2, пропитанной рабочей жидкостью.

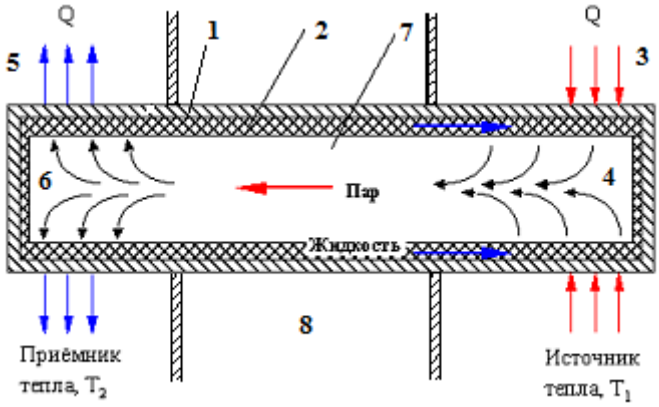


Рис. 1. Устройство и принцип работы ТТ.
1-корпус ТТ, 2-КПС, 3-зона нагрева, 4-испарение рабочей жидкости, 5-зона сброса тепла, 6-конденсация пара, 7-паровой канал, 8-адиабатический участок.

Участок 3, к которому подводится тепло, является испарителем 4, а участок 5, от которого оно отводится - конденсатором рабочей жидкости 6. При нагреве испарителя 4 рабочая жидкость испаряется из пор КПС 2 в паровой канал 7. При этом давление пара в этой зоне повышается. В то же время при охлаждении конденсатора 6 давление пара в нём понижается. Под действием возникшей разности давлений пар в паровом канале 7 движется от испарителя 4 к конденсатору 6, где он конденсируется. Образовавшаяся при конденсации жидкость впитывается в поры КПС 2 конденсатора 6 и за счёт капиллярных сил возвращается по порам в испаритель 4, где она вновь испаряется. Таким образом, ТТ работает на принципе замкнутого испарительно-конденсационного цикла. ТТ характеризуются очень высокой эффективной теплопроводностью в сотни раз превышающую теплопроводность медного стержня такого же диаметра. Теплопередающая способность ТТ чрезвычайно велика. Так, например, ТТ с рабочей жидкостью литием, при рабочей температуре 1700 К может передать тепловой поток 10...20 кВт/см^2. Диапазон рабочих температур действующих ТТ составляет от 4 до 2300 К

[1].

ТТ не имеют движущихся частей, не потребляют энергии, не требуют обслуживания, обладают малым удельным весом, надежны и долговечны.

Наиболее важным элементом конструкции ТТ является КПС или фитиль. Параметрами фитиля, которые являются основными в работе ТТ, являются следующие: минимальное гидравлическое сопротивление (высокая проницаемость) капиллярной структуры вдоль трубы для эффективного транспортирования жидкости из зоны конденсации в зону испарения, максимальная высота капиллярного поднятия (капиллярного впитывания) для возможности работы ТТ против сил гравитации, и максимальная каркасная (в радиальном направлении) теплопроводность для передачи тепла от стенки ТТ к порам КПС.

Главным препятствием на пути широкого внедрения ТТ является несовершенство их КПС. В настоящее время наибольшее распространение получили фитили из металлических сеток и спеченные из порошков или металлических волокон. Основные недостатки фитилей из металлических сеток - это низкая каркасная теплопроводность, возможность расслоения сеток или их отделение их от стенки ТТ, неудовлетворительная работа по переносу рабочей жидкости против сил гравитации (низкая высота капиллярного поднятия). Применяемые фитили из спеченных порошковых материалов имеют высокое гидравлическое сопротивление, обусловленное наличием тупиковых и замкнутых пор. Спеченные фитили из металлических волокон обладают высокой проницаемостью ввиду полного отсутствия тупиковых и замкнутых пор, хорошим капиллярным впитыванием и высокой каркасной теплопроводностью. Существенным недостатком таких структур является крайняя нетехнологичность их получения, связанная с получением монодисперсных волокон и их дальнейшей переработкой для получения КПС.

При работе в условиях невесомости на космических аппаратах получили распространение конструкционные КПС (рис. 2), т.е. выполненные непосредственно на корпусе ТТ методом экструзии или прессования [2].

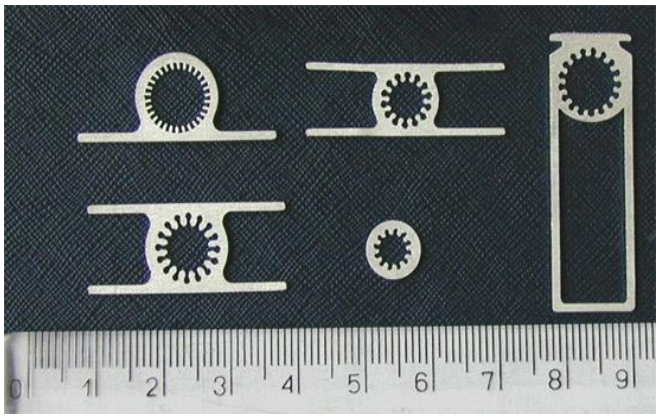
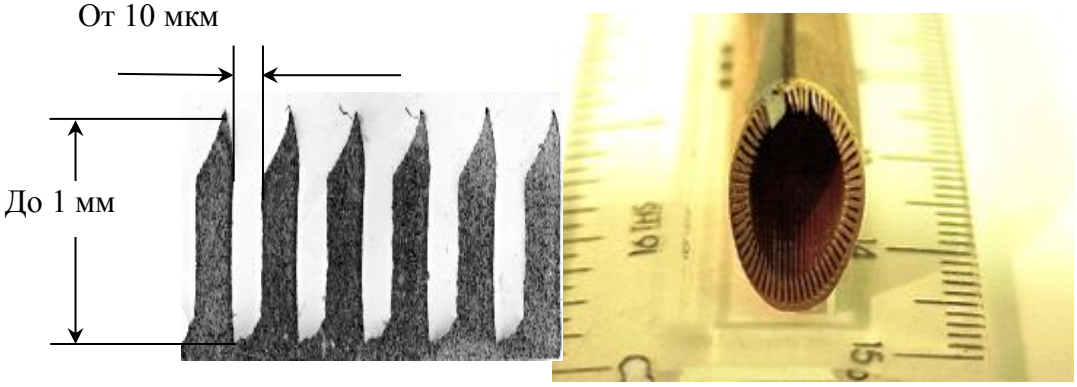


Рис. 2. Примеры конструкционных КПС из алюминиевого сплава [3].

Конструкционные КС обладают наибольшей жидкостной проницаемостью и минимальной каркасной теплопроводностью, но для существующих технологических методов высота капиллярного поднятия недопустимо мала ввиду существенных ограничений по минимально-получаемой величине межреберного зазора. Технология их получения накладывает также существенное ограничение на материал ТТ.

В МГТУ имени Н.Э. Баумана разработан новый метод механической обработки – деформирующее резание (ДР), основанный на подрезании слоев обрабатываемой заготовки и целенаправленном пластическом деформировании подрезанного слоя. Образующаяся при обработке методом ДР стружка не отделяется по своей узкой стороне от заготовки и образует развитый макрорельеф, состоящий из ребер и щелевого зазора

между ними. Применение метода ДР при оребрении листовой заготовки позволяет получать капиллярные структуры с шириной капиллярного зазора от нескольких десятков микрометров и выше [4]. В дальнейшем, оребренный лист формуется в трубу, сваривается (спаивается) и герметизируется по торцам, образуя ТТ с конструкционным типом КПС (рис. 3).



а б

Рис. 3. КПС, полученная методом ДР (а) и ТТ, сформированная из оребренной ДР листовой заготовки (б).

Основными преимуществами конструкционных КС, получаемых ДР, являются постоянство параметров структуры, низкое гидравлическое сопротивление, обусловленное прямолинейностью капиллярных каналов и большой капиллярный напор ввиду возможности получения достаточно узких межреберных зазоров.

В рамках данного исследования для получения капиллярного оребрения методом ДР на тонколистовых заготовках разработана и изготовлена специальная оснастка к токарно-винторезному станку.

Оснастка представляет собой барабан для закрепления и натяжения листовой заготовки (рис. 4). Барабан имеет симметричные пазы 1, натяжные 2 и прижимные планки 3, пружины 4 для возврата натяжных планок, и винты 5, 6. Барабан выполнен из литьевого алюминиевого сплава. Для базирования барабана в центрах станка предусмотрены стальные втулки 7 с базовыми коническими отверстиями. Зажатие металлического листа осуществляется с помощью прижимных планок 3 винтами 6. Лист натягивается за счет утопления натяжных планок 2 внутрь барабана винтами 5.

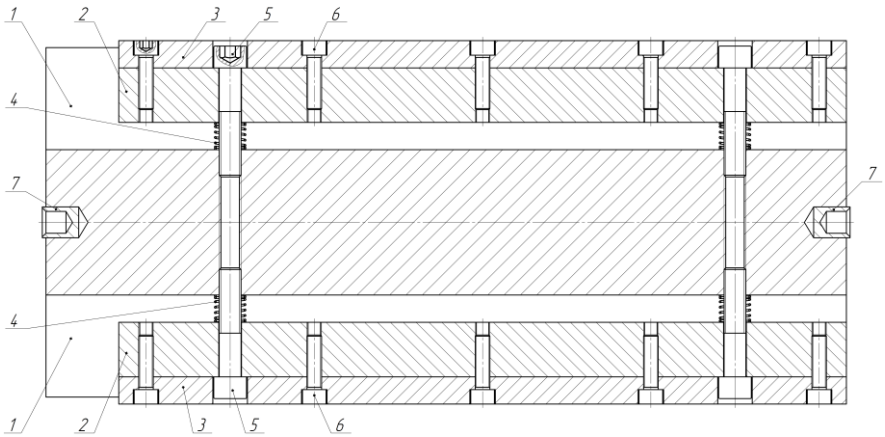


Рис. 4. Чертеж оснастки для получения капиллярного оребрения методом ДР.

Диаметр барабана составляет 196 мм (рис. 5) и позволяет обрабатывать одновременно два листа с габаритами 400х290 мм, толщиной 0,15…1 мм. Диаметр барабана выбран макисально воэможным для уменьшения кривизны натягиваемых листовых заготовок с учетом его использования на наиболее распространенных токарно-

винторезных станках, имеющих высоту центров станка над поперечным суппортом 100 мм. Симметричность расположения натяжных планок для барабана большого диаметра обусловлена возможностью равномерного натяжения листов по половине длины окружности, что проблематично для листа, охватывающего всю длину окружности барабана. Помимо этого, симметричность барабана в диаметральной плоскости устраняет проблему его балансировки. Передача крутящего момента от шпинделя станка на барабан, закрепленного в центрах, осуществляется одним кулачком, трехкулачкового патрона, вставленным в паз барабана. Остальные кулачки снимаются. После установки барабана на станке, для устранения возможных биений, он протачивается "как чисто".

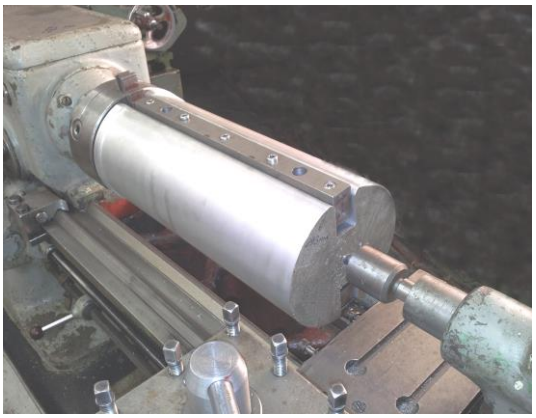
Управление шириной межреберного зазора b осуществляется для вертикальных ребер назначением главного угла инструмента в плане φ при выбранной подаче S_0 [4].

$$b = S_0 \cdot (1 - sin\varphi).$$

Высота оребрения h для вертикальных ребер, полученных ДР определяется по следующей формуле

$$h = t / \sin\varphi + 0{,}5 \cdot (S_0 \cdot \cos\varphi).$$





а б

Рис. 5. Модель (а) и фотография (б) оснастки для получения капиллярного оребрения методом ДР.

К сожалению, теоретические формулы дают погрешность при вычислении ширины b и высоты h получаемого межреберного зазора. Это несоответствие обусловлено влиянием свойств обрабатываемого материала при пластическом течении в зоне ДР. В настоящей работе выполнено сравнение формы получаемых капиллярных зазоров в зависимости от вида обрабатываемого материала.

Сравнивались поперечные срезы капиллярных структур, полученных ДР на разных материалах при одинаковых технологических параметрах их получения. Подача составляла S_0=0,16 мм при глубине резания t=0,12 мм. Инструмент для ДР имел углы режуще-деформирующего клина: $\varphi = 51^\circ, \varphi_1 = 90^\circ, \alpha = 6^\circ, \alpha_1 = 3^\circ$. В качестве заготовки использовались металлические листы из меди М1, алюминиевого сплава АД1, титана ВТ1-0 и коррозионностойкой стали 304L (российский аналог сталь 03Х18Н11). Полученные шлифы поперечных срезов капиллярных структур фотографировались на оптическом микроскопе с использованием приставки для получения видеоизображений на ПЭВМ Levenhuk D50L и представлены на рис. 6.

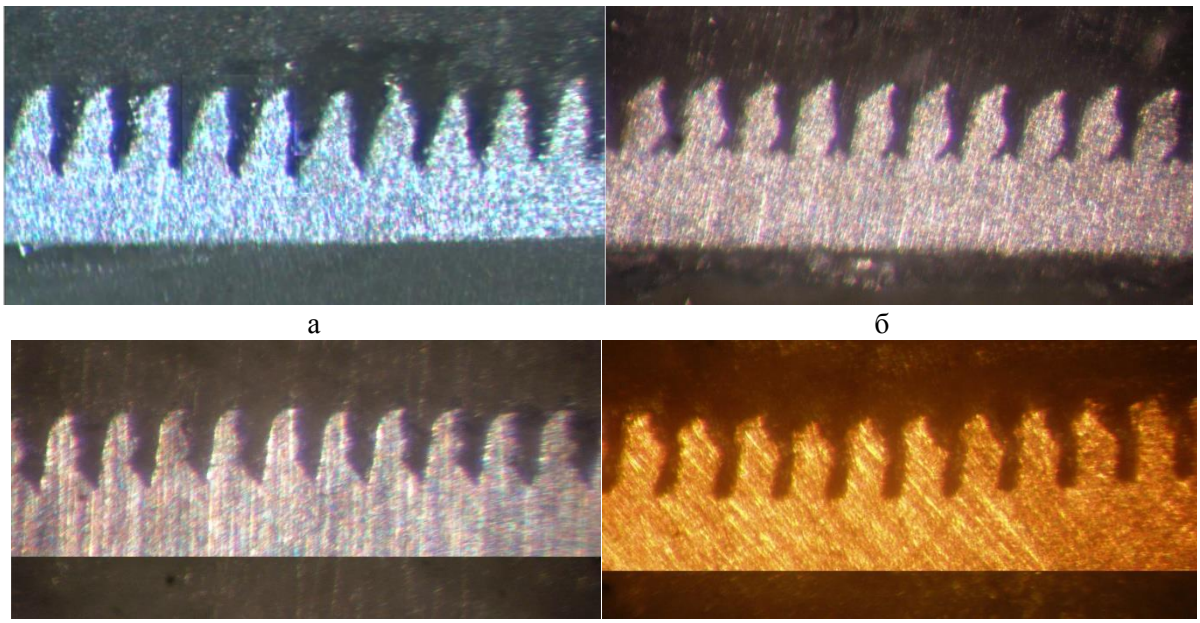


Рис. 6. Поперечные шлифы капиллярных структур, полученных ДР, на различных материалах: а - алюминиевый сплав, б - титан, в - коррозионностойкая сталь, г - медь.

Расчетные зависимости при указанных параметрах обработки дают величину межреберного зазора 0,036 мм при высоте ребра 0,205 мм. В действительности получены следующие результаты, представленные в табл. 1. Величина межреберного зазора измерялась на половине его высоты.

Таблица 1. Измеренные значения межреберного зазора и высоты ребра для разных обрабатываемых материалов

Материал	Ширина межреберного зазора b, мм	Высота ребра h, мм
Алюминиевый сплав	0,06	0,21
Титан	0,05	0,22
Коррозионностойкая сталь	0,09	0,22
Медь	0,04	0,24

По ширине *b* капиллярного зазора наибольшее соответствие с расчетными зависимостями получено для меди, по высоте *h*-для алюминиевого сплава. Максимальное отличие по *b* отмечается для коррозионностойкой стали и алюминиевого сплава. Для алюминиевого сплава и коррозионностойкой стали капиллярный зазор расширяется в верхней части. Для меди он постоянен. Для титана имеется неравномерность зазора с минимумом его ширины в нижней трети высоты ребра.

Форма капиллярного зазора является важным параметром, влияющим на работоспособность ТТ. Поскольку пар в ТТ движется с большой скоростью в направлении, противоположном движению жидкости в капиллярах КПС, то он может тормозить это движение. Поэтому для конструкционных ТТ стремятся уменьшить зону взаимодействия пара с жидкостью за счет сужения капиллярного зазора в его верхней части, что видно на поперечных срезах ТТ с конструкционной КПС (рис. 2). С этой точки зрения наименее благоприятная форма капиллярных каналов, расширяющихся в верхней части, сформировалась на алюминиевом сплаве и коррозионностойкой стали. Наиболее благоприятная форма капиллярных каналов, имеющих сужение, получена на титане.

Литература

1. Дан П.Д., Рей Д.А. Тепловые трубы.- М.: Энергия, 1979.- 272 с.
2. Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Ягодкин И.В. Физические основы тепловых труб. - М.: Атомиздат, 1978, - 256 с.
3. Григорьян С.Г. Конструирование электронных устройств систем автоматизации и вычислительной техники. - Рн/Д.: Феникс, 2007. - 303 с.
4. Зубков Н.Н. Разработка и исследование метода деформирующего резания как способа формообразования развитых макрорельефов: Дис. … докт. техн. наук. - М., 2001. - 478с.
5. Особенности реализации метода деформирующего резания Зубков Н.Н. Технология машиностроения. 2001. № 1. С. 19-26.

Секция III

Технологии машиностроения

Председатель: **Васильев Александр Сергеевич**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии машиностроения» (МТ-3)

Ученый секретарь: **Заставный Евгений Александрович**
кандидат технических наук, доцент кафедры МТ-3

УДК 621.9.06

РЕШЕНИЕ ВОПРОСА О СТЕПЕНИ ЗАГРУЗКИ ОБОРУДОВАНИЯ ГИБКОЙ СБОРОЧНОЙ ЛИНИИ С ПОМОЩЬЮ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Елена Витальевна Пипенко, Николай Александрович Пышечкин,
студенты 4 курса,
Кафедра: Технология машиностроения,
Московский Государственный Машиностроительный Университет (МАМИ)

Научный руководитель: С.Л. Петухов,
кандидат наук, Доцент, кафедра «Технология машиностроения»

Эффективное использование технологического оборудования в ГПС в значительной степени зависит от ее структуры, определяемой на стадии проектирования. Исходной информацией для проектирования являются сведения о номенклатуре подлежащих сборке изделий (о составе и размере отдельных партий, программах выпуска, видах и размерах соединений), типах сборочных модулей, ограничениях на выбираемое оборудование, инструмент, сборочную оснастку, производственные площади и т.д. Значительная номенклатура собираемых изделий, многообразие маршрутов сборки, стохастический характер поступления различных партий изделий на сборку и объемов этих партий, неполнота априорной информации на этапе проектирования требует решения сложной многовариантной задачи при определении компоновочной схемы линии сборки. Выбор технологического оборудования должен учитывать его встраиваемость в ГПС, конструктивно-компоновочную, энергетическую, информационную совместимость с другими техническими средствами, входящими в состав ГПС, требующуюся производственную площадь.

В зависимости от технологических возможностей в процессе функционирования ГПС сборочные модули могут работать по принципу взаимозаменяемости, взаимодополнения и одновременного использования этих принципов. Выбор принципа организации и взаимодействия сборочных модулей зависит от их технологических возможностей, обеспечения оперативной смены запрессовочных, резьбозавертывающих и других устройств, от номенклатуры подлежащих сборке изделий и заданной программы их выпуска. Принятая организация взаимодействия сборочных модулей в зависимости от условий производства может быть изменена путем переналадки оборудования.

Процесс проектирования включает в себя определение количества сборочных и контрольно-измерительных позиций, количество и объем накопителей, пространственное расположение основного и вспомогательного оборудования; разработка управления транспортной системой. На этапах выбора состава технологического оборудования и структуры автоматизированной линии из этого оборудования возможны альтернативные варианты, то есть неоднозначность выбора технических решений. Капитальные вложения и риск ошибочного решения могут быть снижены за счет рассмотрения нескольких вариантов, адекватных производственному процессу в ГПС, то есть при проектировании должны сравниваться альтернативные варианты. Возникает задача выбора из возможного многообразия структур оптимального варианта, которая решается поэтапно.

На первом этапе определяется оптимальный вариант компоновки ГПС, который характеризуется классом концентрации операций, количеством сборочных и контрольно-измерительных позиций; количеством транспортных устройств, систем загрузки и разгрузки, накопителей; предварительной компоновочной схемы. Осуществляется синхронизация работы гибких сборочных модулей ГПС, управление материальными потоками. В зависимости от конкретных производственных условий критериями

управления могут быть: минимизация времени переналадки оборудования при переходе на выпуск новых изделий, максимальная гибкость к изменениям критериев функционирования и другие. В качестве теоретической базы при решении этих задач используется метод направленного поиска, линейное программирование, теория графов.

Второй этап проектирования связан с оптимизацией выбранного варианта относительно целевых параметров; выбора оптимальной структуры транспортной системы; получения максимальной суммарной загрузки основного технологического оборудования и оптимальных параметров сборочной линии; максимальной производительности ГПС и др. При сборке изделий в гибких производственных системах затраты времени на вспомогательные операции (установка, транспортировка, хранение узлов и деталей), а также время ожидания зависят в значительной степени от структурного построения этой системы. Исходя из этого, на стадии проектирования необходимо уделить особое внимание правильности выбора структурного варианта ГПС. В настоящее время при проектировании сложных структур и компоновок многопозиционных автоматизированных линий используется метод статистического моделирования работы технологического оборудования, существенно повышающий качество проектных решений и точность расчетов на стадии проектирования. Статистическое моделирование представляет собой имитацию функционирования сложных автоматизированных комплексов на основе использования закономерностей, полученных с помощью производственного эксперимента.

Для сборки валов коробок передач, выбранных на разных заводах-изготовителях, была спроектирована гибкая автоматизированная линия, в которой использовалось однотипное оборудование с переналадкой установочных приспособлений, ориентирующих и подающих устройств и механизмов.

Практика создания гибких сборочных линий выдвинула задачу повышения эффективности их загрузки, достижения заданного уровня коэффициента технического использования. Оптимальный вариант загрузки существенно повышает технико-экономическую эффективность. Для решения задачи с любым числом переменных наиболее распространенным и универсальным является симплекс-метод, реализующий идею последовательного улучшения решения. Для поиска оптимальной загрузки использовался метод линейного программирования.

При создании гибкой переналаживаемой линии решались задачи обеспечения максимального использования ее ресурсов, расход которых обусловлен выбором наиболее экономичной гибкости и организационно-планового обеспечения.

Сборка изделий на линии производится партиями, размеры которых экономически обоснованы и соответствуют оптимальной загрузке оборудования - $\hat{E}_{ç.î.îïò}$, предусмотрена оптимальная периодичность смены отдельных партий для гарантированного выпуска конечной продукции в заданные сроки и с минимальными приведенными затратами - $Ç_{ïîD}$ min. Рассчитанное распределение объемов партий валов должно обеспечить такое функционирование линии, при котором величина $\hat{E}_{çî.}$ будет находиться в пределах допустимого. Для оценки равномерности распределения объемов выпуска валов использовалась характеристика, называемая в теории информации энтропией.

Проведенные расчеты дали возможность получить интегральную оценку колебаний объемов производства и концентрации выпуска продукции через значение энтропии для любой совокупности валов. Были определены приведенные затраты в связи с изменением потребности в ресурсах, получена количественная оценка объединения валов в партии для сборки и оценены потери из-за излишнего резервирования мощностей и других резервов производства. Проведенная оценка показала целесообразность принятого распределения

программы выпуска по плановым отрезкам года и возможность достижения оптимальной устойчивости производства при освоении новых изделий.

Для решения задач определения оптимального числа партий различных изделий, запускаемых на сборку на нескольких модулях в течение смены, применяют общие методы линейного программирования. Каждое граничное условие изображается не прямой, а плоскостью. Областью допустимых решений является многогранник, ограниченный этими плоскостями. Например, при сборке на производственно-технологическом комплексе двух видов валов коробки передач автомобиля (первичный и вторичный) на трех типах модулей с различным числом позиций (модули А, В и С), необходимо оптимизировать объемы партии изделий, обеспечивающие наибольшую эффективность использования модулей. Поставленная цель - при требуемой программе выпуска изделий обеспечить заданную величину коэффициента технического использования.

За базовую конструкцию изделия была принята конструкция, обладающая наибольшим числом общих признаков всей группы валов. Все остальные конструкции представляли собой модификации базовой. Разработанная технологическая схема групповой сборки включила в себя все операции сборки базового вала.

Для этой схемы групповой сборки была выбрана компоновка гибкой автоматизированной линия. Шестерни на сборку должны поступать комплектом с ранее прикатанными и подобранными по контактному пятну ведущей и ведомой шестернями. Принятая схема базирования собираемого узла обеспечила минимальную погрешность установки.

Линия оснащена устройствами, автоматизирующими подачу, ориентацию и установку роликовых подшипников и сальников. Предусмотрены специальные устройства для смазки подшипников, нанесения консистентной смазки и подачи герметизирующей пасты в гнезда картера. Также автоматизированы операции по измерению положения подшипников в картере, завертыванию гайки с тарированным крутящим моментом, контроль биения соединительных фланцев и клеймения узлов в сборе.

Основным методом повышения производительности является деление линии на участки с промежуточными накопителями заделов. Расчет производительности сборочного оборудования сводится к расчету коэффициента использования с помощью статистического моделирования.

Моделирование использовалось как для укрупненного сравнения нескольких вариантов компоновок автоматизированных линий сборки, так и для детального анализа различных стратегий обслуживания и параметров линии.

Моделирование позволяет по исходным данным, содержащим сведения о начальном состоянии сборочного оборудования и его параметрах получить сведения о состоянии оборудования в произвольный момент времени. Разработанная авторами программа для вычисления показателей надежности гибких автоматических линий с промежуточными накопителями заделов дает возможность не только оценить вероятность безотказной работы , то есть функциональную надежность, но и позволяет одновременно учитывать влияние параметрической надежности (соответствие точности сборки изделия заданным параметрам) в зависимости от реализованных в системе компоновочных решений.

Предполагается, что каждая автоматическая позиция может находиться в пяти состояниях: работоспособное; «отказ-восстановление»; опустошение предшествующего накопителя; переполнение последующего накопителя для готовой детали; параметрический отказ.

Каждая из ручных позиций может находиться в тех же состояниях, за исключением «отказ- восстановление». При моделировании работы сборочной линии для каждой позиции определяется и запоминается случайное время до очередной смены состояния i – й позиции $ТО_i$. Из этих времен $ТО_i$, выбирается минимальное $Т0_{min}=Т0_к$, т.е.

устанавливается, что очередная смена состояния произошла на k-ой позиции, и рассматривается, в какое из пяти состояний попала эта позиция. В результате, текущее время $T0_K$ увеличивается на ту или иную величину (в зависимости от состояния позиции). Затем, снова из всех разыгранных в соответствии с экспоненциальным распределением времен выбирается минимальное и повторяется та же операция с новым $T0_{min}$.

Анализ значительного количества экспериментальных данных показал, что случайное время безотказной работы сборочных позиций ($t_{ðàá}$) может быть описано законом Вейбулла: $t_{ðàá} = \frac{\bar{t}_{ðàá}}{\Gamma(1+\frac{1}{b})} \sqrt[b]{-\ln X}$, а время восстановления распределено по экспоненциальному закону: $t_{ðåì} = \frac{1}{\mu_{iá}} \ln(1-X)$, где $\bar{t}_{ðàá}$ - наработка на отказ; Г –гамма-функция; b – показатель степени, определяющий форму кривой распределения; $\mu_{iá} = \frac{1}{\bar{t}_{ðåì}}$ - интенсивность восстановления отказов оборудования ($\bar{t}_{ðåì}$ - среднее время ремонта позиции).

Предполагалось, что со стороны сборочной линии в потоке отказов отдельных позиций не вносятся дополнительные отказы.

При очередной смене состояния позиция будет работать в том случае, если:

· в предшествующем k-м накопителе есть хотя бы одно изделие ($NB_k \geq 1$);

· в последующем (k+1)-м накопителе есть место для собранного изделия (текущая емкость (k+1)-го накопителя $NB_{(k+1)}$ меньше его максимальной емкости $NA_{(k+1)}$; на позиции не произошел параметрический отказ (полученный зазор в соединении оказался в пределах допуска).

При выполнении всех этих условий текущее время $T0_K$ и суммарное рабочее время на k-й позиции увеличивается на величину времени сборки изделия на k-ой позиции. По стандартной программе на ЭВМ разыгрывается случайное число X, распределенное по закону равной вероятности в интервале $[0,1]$ и по закону распределения Вейбулла рассчитывается время $t_{ðàá}$.

Состояние «отказ-восстановление» возникает после работоспособного состояния, если время наступления очередного отказа оказалось меньше времени $T0_K$. Рассчитывается длительность восстановления k-ой позиции. При этом $T0_K$ и суммарное время ремонта линии увеличиваются на время восстановления работоспособности позиции.

Состояние «ожидание изделия с предыдущей позиции» возникает, если в последующем (k+1)-м накопителе есть место для собранного изделия, а в k-м накопителе нет ни одного изделия ($NB_k = 0$). В этом случае текущее время k-й позиции $T0_K$ становится равным сумме текущего времени предыдущей позиции
$T0_{(K-1)}$ и времени на доставку изделия спутником L_k /V, где V - скорость перемещения спутника.

Состояние «ожидание свободного места для собранного изделия» возникает при полном заполнении последующего накопителя ($NB_{(k+1)} = NA_{(k+1)}$). Время наступления очередного отказа и время простоев из-за ожидания свободного места в накопителе увеличиваются на время простоя k-й позиции.

При автоматической сборке большие трудности вызывает обеспечение безотказности выполнения сопряжения деталей. Величина погрешности относительной ориентации деталей получается путем моделирования погрешностей составляющих звеньев размерной цепи и их суммирования. Параметрический отказ происходит в случае,

если полученный зазор вышел за пределы поля допуска. В этом случае число бракованных изделий увеличивается на единицу. Текущее время k-й позиции $T0_K$ увеличивается на величину времени, необходимого для удаления бракованного изделия с позиции.

Моделирование продолжается до тех пор, пока не закончится заданное время моделирования Т. После чего определяется коэффициент технического использования:

$\eta = \frac{\sum T_{РАБ}}{\sum T_{РАБ}+\sum T_{РЕМ}+\sum T_{НП}+\sum T_{П.О.}}$, где

$\sum T_{НП}$ - суммарное время наложенных простоев,

$\sum T_{П.О.}$ - суммарное время параметрических отказов,

$\sum T_{РАБ}$- суммарное время работоспособного состояния,

$\sum T_{РЕМ}$ - суммарное время, затраченное на ремонт оборудования.

Важно оценить производственные возможности несинхронных многоучастковых линий уже на стадии проектирования, поскольку ошибки в определении ожидаемой производительности могут повлечь за собой дополнительные расходы средств и времени для внесения изменений по результатам промышленных испытаний либо неоправданное завышение стоимости линии вследствие неполной загрузки оборудования, увеличение габаритных размеров, производственных площадей и металлоемкости конструкции. Моделирование работы автоматизированных линий при достаточной точности исходных данных позволяет получить полную и объективную информацию об их функционировании, которая, в свою очередь, является исходной для расчета параметров исследуемой линии. Полученные результаты помогают прогнозировать основные характеристики оборудования на стадии проектирования с целью выбора оптимальных конструктивно-технологических решений, изучить влияние надежности отдельных улов и модулей на эффективность работы линии в целом. Предлагаемый подход к определению оптимальных параметров гибких автоматизированных линий позволит решить вопрос о степени загрузки оборудования и выявить «узкие места» на стадии проектирования.

Автоматизированная линия сборки пяти различных типов валов коробок передач с возможностью перехода на другие типы, имеет модульную структуру и включает в себя модули сборки на базе роботов с числовым программным управлением, а также манипуляторов и механизмов с пневматическими и гидравлическими приводами, управляемых от программных контроллеров. Модули объединены несинхронным горизонтально замкнутым роликовым транспортером с многоместными приспособлениями - спутниками.

Так как производительность линии в первую очередь зависит от надежности отдельных позиций, то было проанализировано влияние удельной длительности простоев оборудования лимитирующей позиции B_i ($B_i = \frac{\bar{t}_{ðåì}}{\bar{t}_{ðàá}}$) на величину коэффициента технического использования (рисунок 1). За исходные данные для моделирования 11-позиционной сборочной линии были приняты: такт выпуска τ = 1,2 мин; максимальная емкость накопителей между позициями NB_k=5, величина среднего времени работы $\bar{t}_{ðàá}$ оставалась постоянной. При этом менялись величина среднего времени ремонта $\bar{t}_{ðåì}$. Как видно из рисунка 1, необходимая производительность для рассматриваемого варианта линии обеспечивается лишь при значении удельной длительности простоев оборудования лимитирующей позиции B_i не выше 0,15. Следовательно, усредненные хронометражные данные о потерях времени из-за отказов нормализованных и типовых сборочных узлов, используемые для оценки надежности проектируемого сборочного оборудования, должны

обязательно включать в себя значения как среднего времени безотказной работы узла $\bar{t}_{ðàá}$, так и среднего времени на устранение отказа $\bar{t}_{ðåì}$.

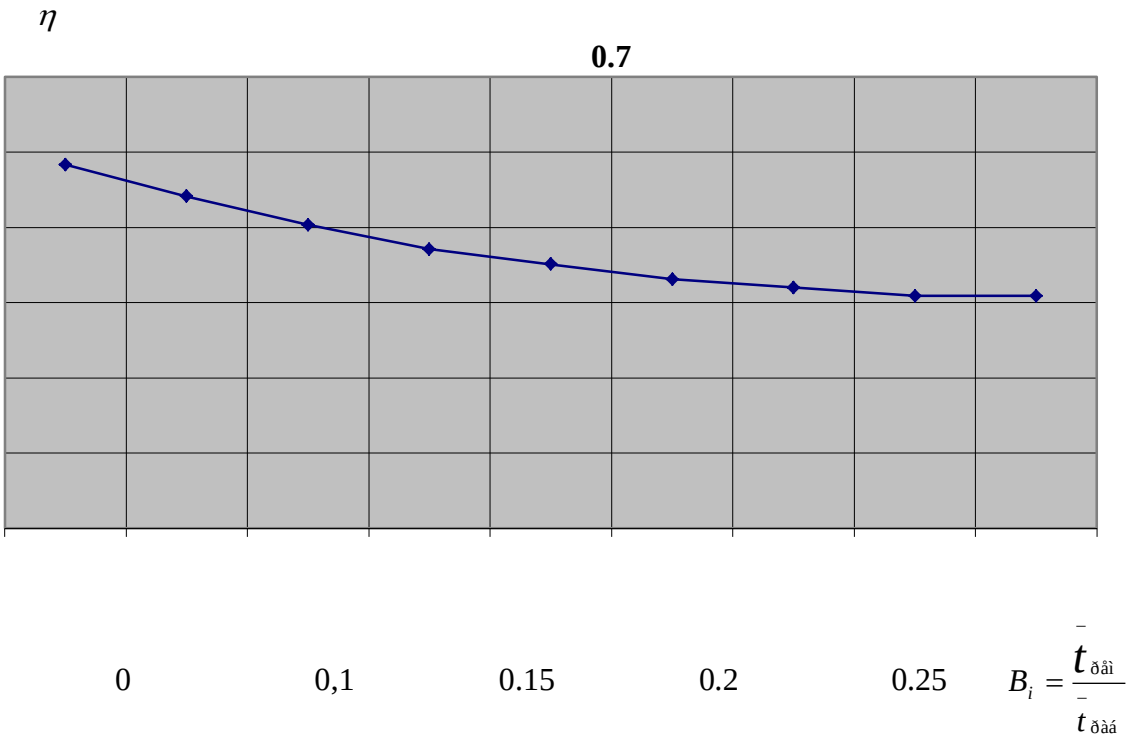


Рисунок 1. Влияние величины средней удельной длительности простоев B_i лимитирующей позиции на коэффициент технического использования η

Коэффициент технического использования зависит от емкости межпозиционных накопителей заделов, позволяющих позиции при очередной смене состояния работать в том случае, если в предшествующем накопителе есть хотя бы одно изделие, а в последующем накопителе есть место для собранного изделия. Полученная зависимость $\eta = f(Z)$ (рисунок 2) позволяет сделать вывод, что между позициями достаточно иметь расстояние для четырех-пяти спутников, так как дальнейшее увеличение задела не приведет к повышению производительности. Расстояние между позициями принято L=4 м и определяется конструктивно.

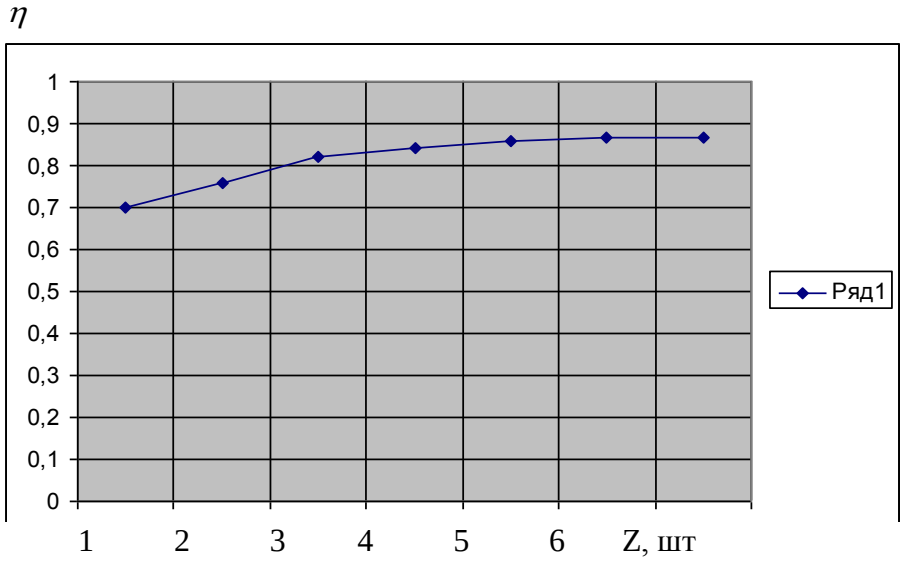


Рисунок 2. Зависимость коэффициента технического использования η несинхронной автоматической линии от емкости межпозиционного накопителя Z.

С целью определения оптимального количества спутников на линии в целом проводилось моделирование ее работы при разном числе спутников между позициями и разной скорости их перемещения (рисунок 3). Исследования показали, что в зависимости от программы выпуска в линии с принятыми параметрами одновременно должно находиться от 30 до 40 спутников, дальнейшее увеличение числа спутников неэффективно.

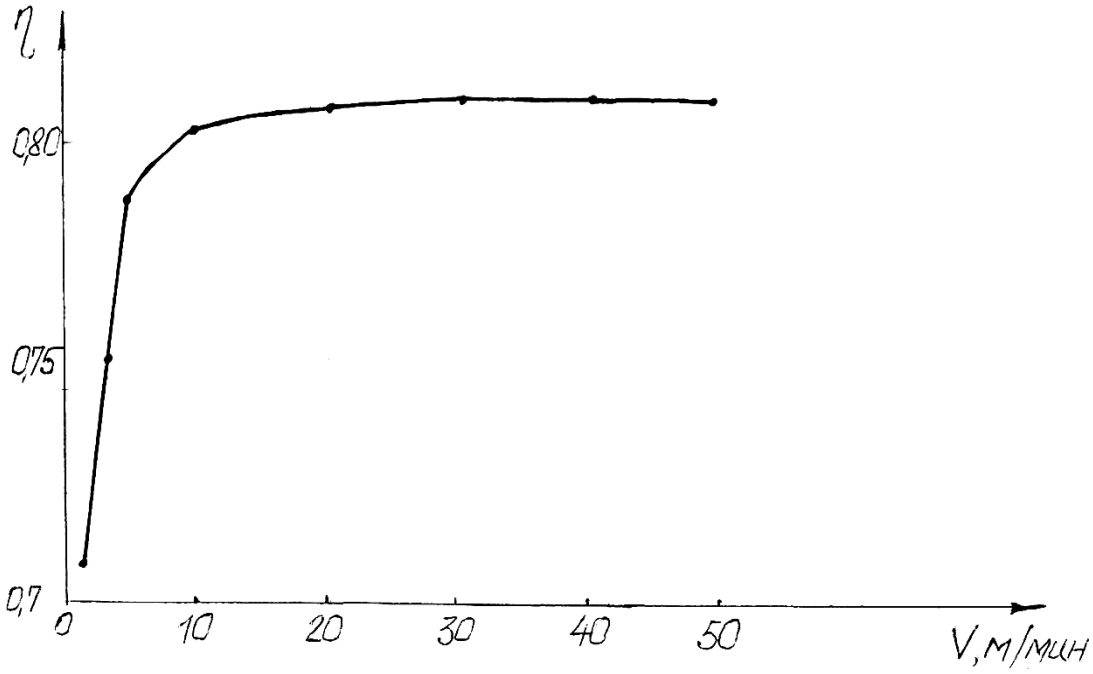


Рисунок 3. Зависимость коэффициента технического использования η несинхронной автоматической линии от скорости перемещения спутников

В случае опустошения накопителей между позициями время простоя позиции увеличивается на время перемещения спутника от предшествующей позиции к последующей, рассчитываемое как $\frac{L}{V}$, где V - скорость перемещения спутников. Если скорость перемещения спутников не обеспечивает своевременной подачи изделия на позицию, то происходит снижение величины коэффициента технического использования η. Исследования производительности действующих сборочных линий показало, что скорость перемещения спутников на них часто является заниженной. Моделирование дало возможность установить, что скорость перемещения спутников на проектируемой линии не должна быть ниже 12 м/мин.

При такой скорости практически полностью исключается ее влияние на производительность линии.

С помощью моделирования можно оценить влияние параметрических отказов на производительность сборочной линии (рисунок 4). На всех одиннадцати позициях заданы в качестве исходных данных для сопрягаемых деталей математические ожидания, средние квадратичные отклонения диаметров, нижние и верхние границы допусков на зазор. На пяти позициях производится напрессовка шестрен на промежуточный вал. При крупносерийном и массовом производстве, отличающихся стабильностью процесса, рассеяние размеров сопрягаемых отверстия и вала не превышают $\pm 3\sigma$ от среднего значения совокупности.

Условие собираемости двух деталей соединения выражено величиной: $n_T = (S_{\max} - S_{\min})/(6\sigma_{\hat{I}} + 6\sigma_{\hat{A}})$, то есть отношением допуска зазора $(S_{\max} - S_{\min})$ к

удвоенной погрешности относительного положения центров отверстия и вала при выбранной схеме базирования ($\Delta = 6\sigma_{\hat{I}} + 6\sigma_{\hat{A}}$), где $\sigma_{\hat{I}}$ и $\sigma_{\hat{A}}$ - средние квадратичные отклонения параметров отверстия и вала.

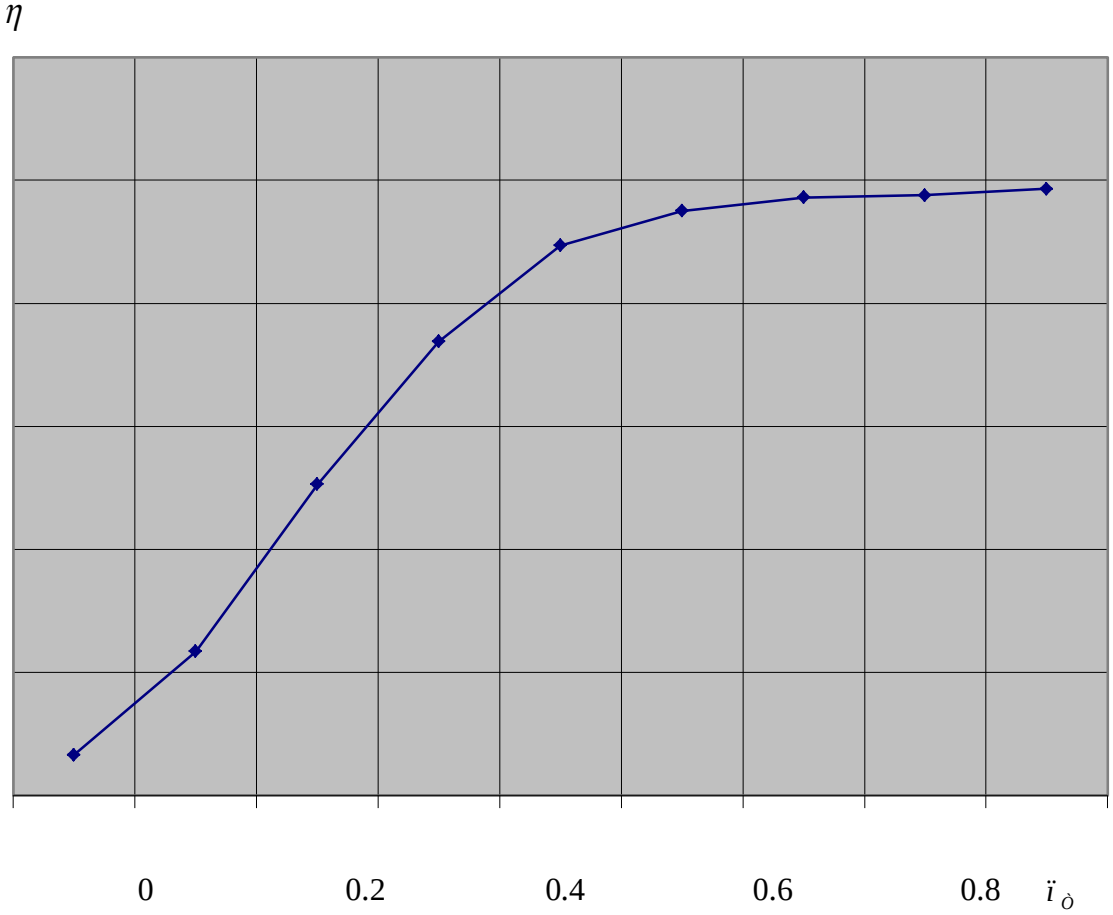


Рисунок 4. Влияние точности собираемых изделий на производительность линии

На рисунке 4 представлены результаты моделирования, проведенного с целью определения коэффициента технического использования η в зависимости от величины коэффициента собираемости $ï_{Ò}$, который показывает, что с уменьшением $ï_{Ò}$ уменьшается η. Изменение $ï_{Ò}$ от 1 до 0,5 дает изменение η всего на 10%, поэтому желательно для эффективного использования линии обеспечивать точность сопрягаемых деталей, необходимую для получения $ï_{Ò}$ от 0,5 до 1.

Недоучет влияния параметрических отказов приводит к снижению производительности работающих гибких сборочных линий по сравнению с проектируемыми.

Разработанная программа моделирования работы гибких сборочных автоматизированных линий дает возможность путем изменения вариантов задачи выбрать количество позиций и тип связей между позициями линии сборки (жесткая, гибкая, комбинированная), определить концентрацию сборочных механизмов на каждой позиции, расположение заделов и их объемы, общее количество спутников, скорость их перемещения, компоновочные размеры линии и т.д. С использованием статистических данных о точности поступающих на сборку деталей возможно установить величину коэффициента технического использования η с учетом не только функциональных отказов, но и технологической и структурной надежности. Создание гибких автоматизированных систем невозможно без промышленных роботов.

УДК 621.757

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ СОПРЯЖЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА И ВИБРАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА

Никита Александрович Мартынович [(1)], Михаил Владимирович Вартанов [(2)], Элдридж Мамфумо [(3)],
аспирант 3 года [(1)], проф., д.т.н.[(2)], студент 5 курса[(3)]
кафедра «Технология машиностроения»
Университет машиностроения

Научный руководитель: Л.В. Божкова,
доктор технических наук, профессор кафедры «технология машиностроения»

Величина погрешности позиционирования промышленного робота с программным управлением и пассивной адаптацией зачастую не соответствует требуемым условиям собираемости деталей. При этом целесообразным является использование специализированных устройств, существенно уменьшающих первоначальную погрешность позиционирования робота.

В работе [1] и [2] предложена конструкция такого дополнительного специализированного устройства, представляющего собой двухзвенный манипулятор, каждое звено которого приводится в движение от отдельного привода. Звенья этого устройства совершают одновременно вибрационные колебания вокруг взаимно перпендикулярных осей. Втулка (базовая деталь) закреплена на диске, жестко связанном со вторым звеном двухзвенного специализированного устройства. Устанавливаемая деталь – вал упруго базируется в схвате робота (Рис. 1а).

При этом упругие связи в схвате допускают перемещения устанавливаемой детали в вертикальной плоскости по двум взаимно перпендикулярным направлениям (Рис. 1б).

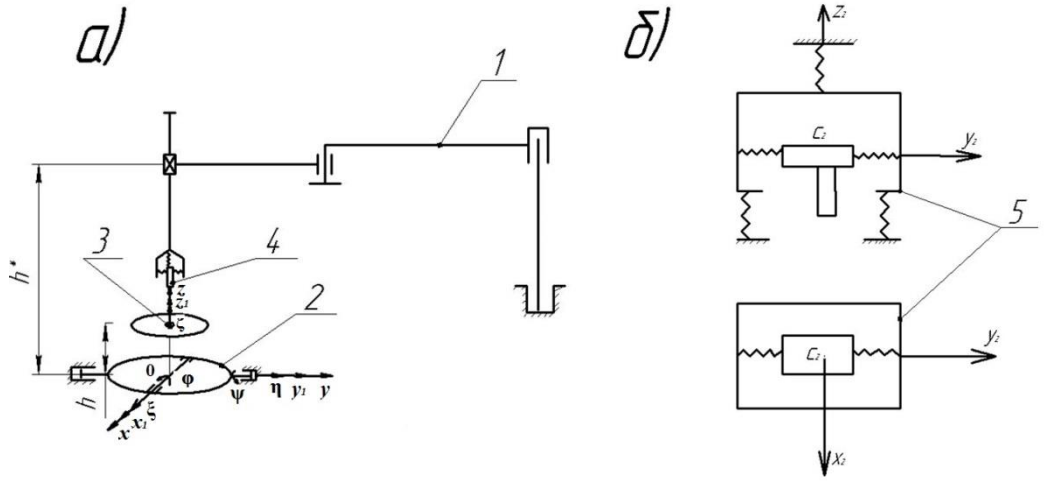


Рис. 1. Кинетическая схема роботизированной сборки при наличии вспомогательного специализированного вибрационного устройства (а) и пассивной адаптивной головки (б):
а) 1 – Робот, 2 – Вибрационное устройство, 3 – Базовая деталь (втулка), 4 – Устанавливаемая деталь (вал);
б) Кинетическая схема упругого закрепления вала в схвате.

Для определенности на рисунок 1а введены три системы координат с общим началом в точке 0:

0*xyz* – неподвижная система координат;

$0x_1y_1z_1$ и $0\xi\eta\zeta$ – системы координат, жестко связанные, соответственно, с первым и вторым звеньями вибрационного устройства. Система координат $c_2x_2y_2z_2$ жестко связана с схватом робота (Рис. 1б).

Вибрационные колебания звеньев устройства происходят вокруг осей $0y$ и $0y_1$ по законам:

$$\psi = A\sin kt,\ \varphi = A\cos kt, \qquad (1)$$

где А – амплитуда, k– круговая частота колебаний.

Рабочим движением основного манипулятора на этапе сопряжения деталей является поступательное перемещение звена, несущего схват вертикально вниз. В [1] рассмотрен случай, когда первоначальные контакт устанавливаемой детали происходит в одной точке с плоскостью ориентирующего диска, на котором закреплена втулка. Для этого случая получены дифференциальные уравнения движения центра масс устанавливаемой детали по отношению к неинерциальной системе отчета координат $0\xi\eta\zeta$, жестко связанной с базовой деталью. Анализ численного решения полученной системы дифференциальных уравнений показывает, что существуют области значений основных динамических и конструктивных параметров сборочного устройства, обеспечивающих асимптотическое приближение центра масс устанавливаемой детали к оси базовой детали. При этом условия собираемости удовлетворяются.

При дальнейшем сопряжении деталей возможны контакты сопрягаемых деталей в одной точке и в двух точках.

На первом этапе решения данной задачи исследуем случай контакта сопрягаемых деталей в одной точке. При этом возможны два варианта контакта деталей:

1. Контакт торца базовой детали с образующей устанавливаемой детали (Рис. 2а);
2. Контакт торца устанавливаемой детали с образующей базовой детали (Рис. 2б).

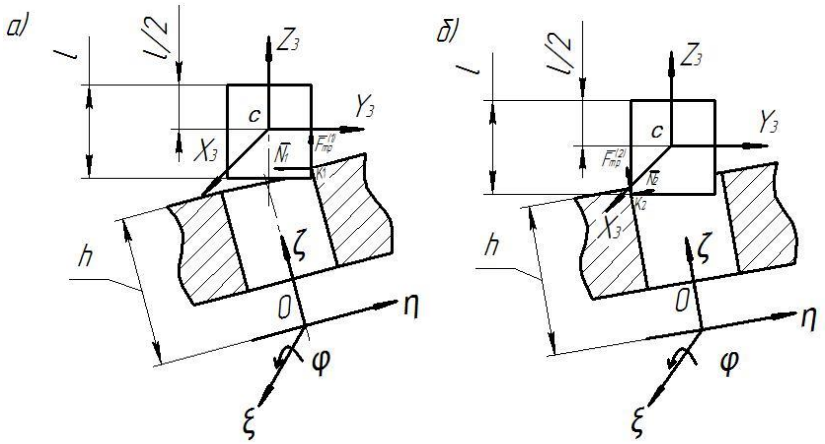


Рис. 2. Контакт сопрягаемых деталей в одной точке:
а) торца базовой детали с образующей устанавливаемой детали;
б) торца устанавливаемой детали с образующей базовой.

На рисунке 2 показана система координат $cx_3y_3z_3$, жестко связанная с устанавливаемой деталью.

Для каждого из вариантов контакта сопрягаемых деталей (Рис. 2а и Рис. 2б) необходимо построить дифференциальные уравнения движения центра масс вала (т. *C*) по отношению к неинерциальной системе координат $0\xi\eta\zeta$, жестко связанной с базовой деталью.

Сначала вычислим дифференциальные уравнения относительного движения центра масс вала при контакте его образующей с торцом втулки.

Дифференциальные уравнения относительного движения центра масс вала в форме второго закона Ньютона имеют вид [3]:

$$m\bar{a}_{cr} = m\bar{g} + \bar{N}_1 + \bar{F}_{mp}^{(1)} + \bar{F}^{уп} + \bar{F}_{ce}^{ин} + \bar{F}_{ck}^{ин} + \bar{F} \qquad (2)$$

где $\bar{a}_{cr}$ – относительное ускорение центра масс вала, $m\bar{g}$ – сила тяжести вала, $\bar{N}_1, \bar{F}_{mp}^{(1)}$ – нормальная реакция и сила трения в точке контакта деталей (K_1) (Рис. 2а), $\bar{F}^{уп}$ – равнодействующая упругих сил в схвате, $\bar{F}_{ce}^{ин}, \bar{F}_{ck}^{ин}$ – переносная и Кориолиса силы инерции центра масс вала, $\bar{F}$ – сборочное усилие, развиваемое приводом робота.

Дифференциальное уравнение (2) необходимо представить в проекциях на оси координат системы $0\xi\eta\zeta$. При этом будем учитывать, что вибрационные колебания происходят с малыми по величине амплитудами, то есть углы ψ и φ, являются малыми. Следовательно, приближенно можно считать, что:

$$\sin\psi \approx \psi, \qquad \sin\varphi \approx \varphi,$$
$$\cos\psi \approx 1, \qquad \cos\varphi \approx 1. \qquad (3)$$

В конечном итоге дифференциальные уравнения относительного движения центра масс приведем к виду:

$$\begin{cases} \ddot{\xi}_c = -\dfrac{c}{m}\left(\xi_c + z_{c2}\psi\right) + \xi_c\dot{\psi}^2 - \eta_c\ddot{\psi}\varphi - 2\eta_c\dot{\psi}\dot{\varphi} - \zeta_c\ddot{\psi} + 2\zeta_c\dot{\psi}\dot{\varphi}\varphi - 2\dot{\psi}\dot{\zeta}_c - 2\dot{\eta}_c\dot{\psi}\varphi + \dfrac{F}{m}\psi; \\ \ddot{\eta}_c = -\dfrac{c}{m}\left(\eta_c - z_{c2}\varphi\right) + \xi_c\ddot{\psi}\varphi + \eta_c\dot{\varphi}^2 + \zeta_c\dot{\psi}^2\varphi + \zeta_c\ddot{\varphi} + 2\dot{\xi}_c\dot{\psi}\varphi + 2\dot{\zeta}_c\dot{\varphi} - \dfrac{F}{m}\varphi; \\ \ddot{\zeta}_c = -\dfrac{c}{m}\left(\zeta_c - z_{c2}\right) + \xi_c\ddot{\psi} + \eta_c\dot{\psi}^2\varphi - \eta_c\ddot{\varphi} + \zeta_c\dot{\varphi}^2 + \zeta_c\dot{\psi}^2 - 2\dot{\eta}_c\dot{\varphi} + 2\dot{\xi}_c\dot{\psi} - \dfrac{F}{m}. \end{cases} \qquad (4)$$

При получении дифференциального уравнения относительного движения центра масс (4) было учтено, что статические составляющие сил упругости уравновешены силами (в том числе силы тяжести детали), вызвавшими деформацию упругих элементов в схвате в положении статического равновесия.

Дифференциальное уравнение (4) содержит неизвестную координату z_{c2} , которая может быть определена по формуле (Рис. 1а):

$$z_{c2} = (l + h) - Vt, \qquad (5)$$

где V – постоянная скорость перемещения вниз третьего звена, несущего схват.

Таким образом, дифференциальные уравнения (4) с учетом (5) определяют относительное движение центра масс вала при контакте сопрягаемых деталей в точке K_1.

Далее необходимо построить дифференциальные уравнения относительного движения центра масс вала при контакте его торца с образующей втулки.

Следующий этап исследования – дифференциальные уравнения относительного движения центра масс вала при контакте его торца с образующей втулки.

Таким образом, рассмотрим следующий этап сопряжения деталей, при котором устанавливаемая деталь (вал) коснется торцом образующей втулки (Рис. 3).

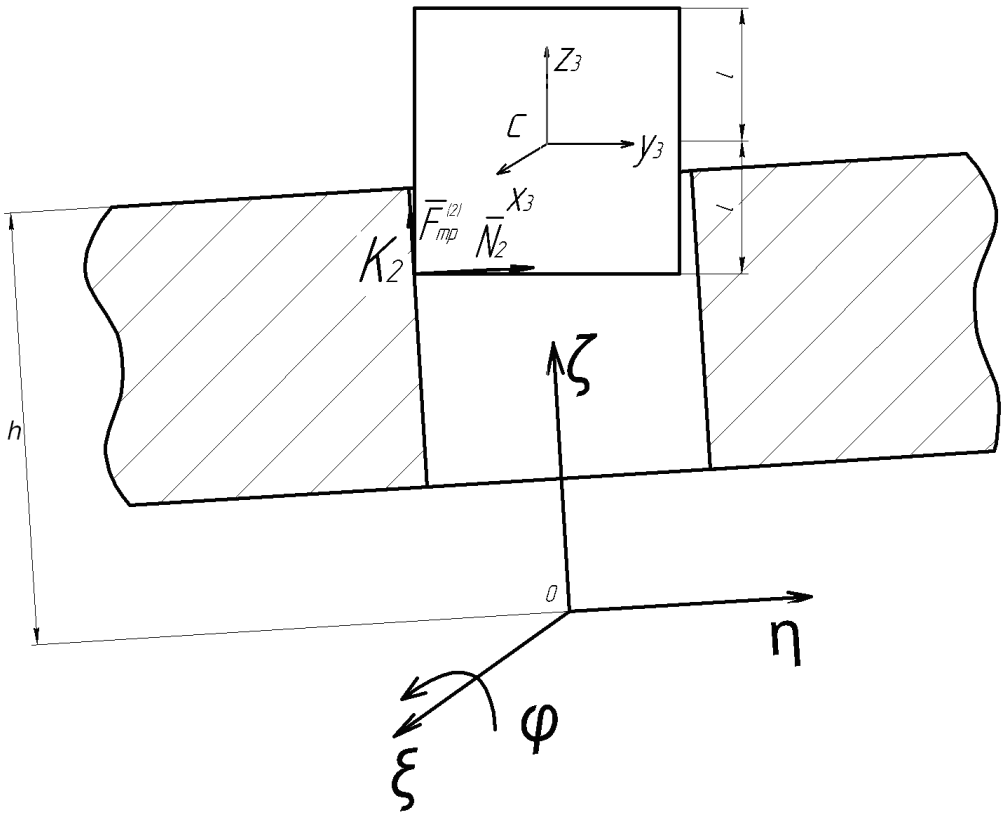


Рис. 3. Расчетная схема одноточечного контакта торца вала и образующей втулки.

При этом дифференциальное уравнение относительного движения центра масс вала будет иметь вид:

$$m\bar{a}_{cr} = m\bar{g} + \bar{N}_2 + \bar{F}_{mp}^{(2)} + \bar{F}^{уп} + \bar{F}_{ce}^{ин} + \bar{F}_{ck}^{ин} + \bar{F}, \qquad (6)$$

где $\bar{a}_{cr}$ – относительное ускорение центра масс, $\bar{N}_2$, $\bar{F}_{mp}^{(2)}$ – нормальная реакция и сила трения, $\bar{F}^{уп}$, $\bar{F}_{ce}^{ин}$, $\bar{F}_{ck}^{ин}$, $\bar{F}$ – соответственно сила упругости, переносная и Кориолиса силы инерции и сборочное усилие.

Дифференциальное уравнение относительного движения центра масс вала (6) в проекциях на оси системы координат 0ξηζ в конечном итоге примут вид:

$$\begin{cases} m\ddot{\xi}_c = -fN_2 \dfrac{l\dot{\psi} + \dot{\xi}_c}{\sqrt{\left(l\dot{\psi} + \dot{\xi}_c\right)^2 + \left(r\dot{\varphi} + \dot{\zeta}_c\right)^2}} - c\left(\xi_c + z_{c2}\psi\right) + \\ + m\left(\xi_c\dot{\psi}^2 - \eta_c\ddot{\psi}\varphi - 2\eta_c\dot{\psi}\dot{\varphi} - \zeta_c\ddot{\psi} + 2\zeta_c\dot{\psi}\dot{\varphi}\varphi\right) + m\left(-2\dot{\psi}\dot{\zeta}_c - 2\dot{\eta}_c\dot{\psi}\varphi\right) + F\psi; \\ m\ddot{\eta}_c = N_2 - c\left(\eta_c - z_{c2}\varphi\right) + m\left(\xi_c\ddot{\psi}\varphi + \eta_c\dot{\varphi}^2 + \zeta_c\dot{\psi}^2\varphi + \zeta_c\ddot{\varphi}\right) + m\left(2\dot{\xi}_c\dot{\psi}\varphi + 2\dot{\zeta}_c\dot{\varphi}\right) - F\varphi; \\ m\ddot{\zeta} = -fN_2 \dfrac{r\dot{\varphi} + \dot{\zeta}_c}{\sqrt{\left(l\dot{\psi} + \dot{\xi}_c\right)^2 + \left(r\dot{\varphi} + \dot{\zeta}_c\right)^2}} - c\left(\zeta_c - z_{c2}\right) + \\ + m\left(\xi_c\ddot{\psi} + \eta_c\dot{\psi}^2\varphi - \eta_c\ddot{\varphi} + \zeta_c\dot{\varphi}^2 + \zeta_c\dot{\psi}^2\right) + m\left(-2\dot{\eta}_c\dot{\varphi} + 2\dot{\xi}_c\dot{\psi}\right) - F. \end{cases} \qquad (7)$$

При одноточечном контакте сопрягаемых деталей одна степень свободы центра масс вала теряется. Следовательно, только два из трех дифференциальных уравнений (7) должны быть независимыми. Для получения этих двух уравнений с учетом условия контакта получим:

$$\eta_c = -\left(R - r\right) + l\varphi, \qquad (8)$$

Второе уравнение системы (7) с учетом (8) позволяет определить нормальную реакцию N_2, а именно:

$$\frac{N_2}{m} = l\ddot{\varphi} + \frac{c}{m}\left(\eta_c - z_{c2}\varphi\right) - \left(\xi_c\ddot{\psi}\varphi + \eta_c\dot{\varphi}^2 + \zeta_c\dot{\psi}^2\varphi + \zeta_c\ddot{\varphi}\right) - \left(2\dot{\xi}_c\dot{\psi}\varphi + 2\dot{\zeta}_c\dot{\varphi}\right) + \frac{F}{m}\varphi. \qquad (9)$$

Таким образом, при наличии контакта торца вала с образующей втулки в точке K_2 (Рис. 3) приближенные (с точностью до величин второго порядка малости) дифференциальные уравнения относительного движения центра масс вала на основании (7) с учетом (9) приведены к виду:

$$\begin{cases} \ddot{\xi}_c = -f\dfrac{N_2}{m}\dfrac{l\dot{\psi} + \dot{\xi}_c}{\sqrt{\left(l\dot{\psi} + \dot{\xi}_c\right)^2 + \left(r\dot{\varphi} + \dot{\zeta}_c\right)^2}} - \dfrac{c}{m}\left(\xi_c + z_{c2}\psi\right) + \xi_c\dot{\psi}^2 - \eta_c\ddot{\psi}\varphi - 2\eta_c\dot{\psi}\dot{\varphi} - \\ - \zeta_c\ddot{\psi} + 2\zeta_c\dot{\psi}\dot{\varphi}\varphi - 2\dot{\psi}\dot{\zeta}_c - 2\dot{\eta}_c\dot{\psi}\varphi + \dfrac{F}{m}\psi; \\ \ddot{\zeta}_c = -f\dfrac{N_2}{m}\dfrac{r\dot{\varphi} + \dot{\zeta}_c}{\sqrt{\left(l\dot{\psi} + \dot{\xi}_c\right)^2 + \left(r\dot{\varphi} + \dot{\zeta}_c\right)^2}} - \dfrac{c}{m}\left(\zeta_c - z_{c2}\right) + \xi_c\ddot{\psi} + \eta_c\dot{\psi}^2\varphi - \eta_c\ddot{\varphi} + \zeta_c\dot{\varphi}^2 + \\ + \zeta_c\dot{\psi}^2 - 2\dot{\eta}_c\dot{\varphi} + 2\dot{\xi}_c\dot{\psi} - \dfrac{F}{m}, \end{cases}$$

(10)

где $\frac{N_2}{m}$ определяется по (9), а затем изменения координаты η_c со временем по формуле (8). Следует отметить, что параметр z_{c2} определяется соотношением (5).

При нарушении контакта сопрягаемых деталей в точке K_2 нормальная реакция $N_2 = 0$ и $F_{mp}^{(2)} = 0$. При этом дифференциальные уравнения движения относительного центра масс (7) примут вид (4).

Контакт деталей может быть нарушен в тот момент времени, когда нормальная реакция N_2, определяемая по (9), станет равной нулю. Значение координат центра масс ξ_c, η_c, ζ_c и составляющих скоростей $\dot{\xi}_c, \dot{\eta}_c, \dot{\zeta}_c$ в момент нарушения контакта деталей будут определять начальные условия при интегрировании дифференциальных уравнений (4).

Далее необходимо построить дифференциальные уравнения движения центра масс вала относительно системы координат, жестко связанной с втулкой, в случае контакта сопрягаемых деталей в двух точках.

Следует детально рассмотреть случай, когда контакт сопрягаемых деталей произойдет в двух точках (K_3) и (K_4). При этом на центральную деталь будут действовать две нормальные реакции ($\overline{N}_3, \overline{N}_4$) и две силы трения ($\overline{F}_{mp}^{(3)}, \overline{F}_{mp}^{(4)}$) (Рис. 4).

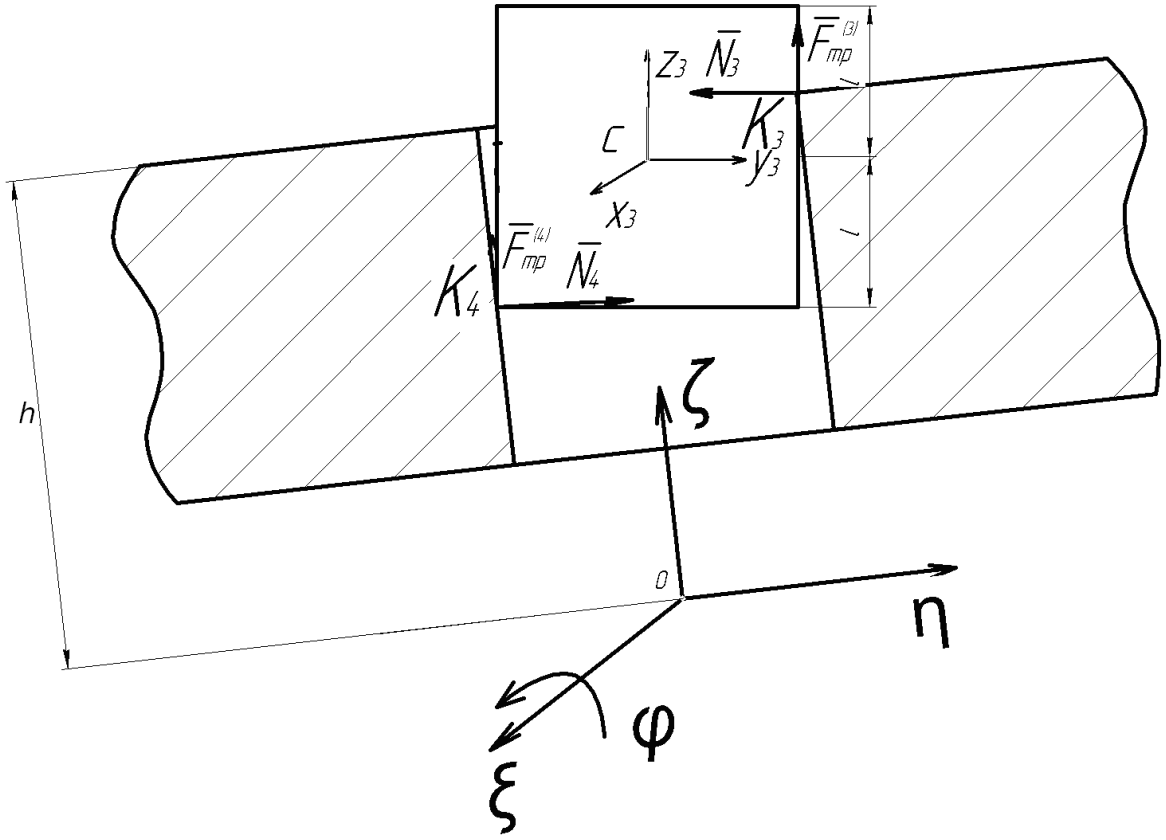


Рис. 4. Расчетная схема двухточечного контакта сопрягаемых поверхностей.

Таким образом, при двухточечном контакте сопрягаемых деталей дифференциальные уравнения относительно движения центра масс вала будут иметь вид:

$$\begin{cases} m\ddot{\xi}_c = N_{3\xi} + N_{4\xi} + F_{mp\xi}^{(3)} + F_{mp\xi}^{(4)} + F_{\xi}^{уп} + F_{ce\xi}^{ин} + F_{ck\xi}^{ин} + F_{\xi}, \\ m\ddot{\eta}_c = N_{3\eta} + N_{4\eta} + F_{mp\eta}^{(3)} + F_{mp\eta}^{(4)} + F_{\eta}^{уп} + F_{ce\eta}^{ин} + F_{ck\eta}^{ин} + F_{\eta}, \\ m\ddot{\xi}_c = N_{3\zeta} + N_{4\zeta} + F_{mp\zeta}^{(3)} + F_{mp\zeta}^{(4)} + F_{\zeta}^{уп} + F_{ce\zeta}^{ин} + F_{ck\zeta}^{ин} + F_{\zeta}. \end{cases} \quad (11)$$

Дифференциальные уравнения относительного движения центра масс устанавливаемой детали (11) в конечном итоге примут вид:

$$\begin{cases} m\ddot{\xi}_c = -fN_3\psi - fN_4 \dfrac{l\dot{\psi} + \dot{\xi}_c}{\sqrt{(l\dot{\psi} + \dot{\xi}_c)^2 + (r\dot{\varphi} + \dot{\zeta}_c)^2}} - c(\xi_c + z_{c2}\psi) + \\ + m(\xi_c\dot{\psi}^2 - \eta_c\ddot{\psi}\varphi - 2\eta_c\dot{\psi}\dot{\varphi} - \zeta_c\ddot{\psi} + 2\zeta_c\dot{\psi}\dot{\varphi}\varphi) + m(-2\dot{\psi}\dot{\zeta}_c - 2\dot{\eta}_c\dot{\psi}\varphi) + F\psi, \\ m\ddot{\eta}_c = -N_3 + N_4 + fN_3\varphi - c(\eta_c - z_{c2}\varphi) + m(\xi_c\ddot{\psi}\varphi + \eta_c\dot{\varphi}^2 + \zeta_c\dot{\psi}^2\varphi + \zeta_c\ddot{\varphi}) + \\ + m(2\dot{\xi}_c\dot{\psi}\varphi + 2\dot{\zeta}_c\dot{\varphi}) - F\varphi; \\ m\ddot{\zeta}_c = N_3\varphi + fN_3 - fN_4 \dfrac{r\dot{\varphi} + \dot{\zeta}_c}{\sqrt{(l\dot{\psi} + \dot{\zeta}_c)^2 + (r\dot{\varphi} + \dot{\zeta}_c)^2}} - c(\zeta_c - z_{c2}) + \\ + m(\xi_c\ddot{\psi} + \eta_c\dot{\psi}^2\varphi - \eta_c\ddot{\varphi} + \zeta_c\dot{\varphi}^2 + \zeta_c\dot{\psi}^2) + m(-2\dot{\eta}_c\dot{\varphi} + 2\dot{\xi}_c\dot{\psi}) - F. \end{cases} \quad (12)$$

В результате получим систему двух линейных алгебраических уравнений, позволяющих определить нормальную реакцию N_3 и N_4. Решив эту систему уравнений, найдем:

$$\frac{N_4}{m}=\frac{1}{[(\varphi+f)-f\dfrac{r\dot\varphi+\dot\zeta_c}{\sqrt{(l\dot\psi+\dot\xi_c)^2+(r\dot\varphi+\dot\zeta_c)^2}}]}([ml\ddot\varphi+\frac{c}{m}(\eta_c-z_{c2}\varphi)-\xi_c\ddot\psi\varphi-\eta_c\dot\varphi^2-$$

$$-\zeta_c\dot\psi^2\varphi-\zeta_c\ddot\varphi-2\dot\xi_c\dot\psi\varphi-2\dot\zeta_c\dot\varphi+\frac{F}{m}\varphi](\varphi+f)+r\ddot\varphi+\frac{c}{m}(\zeta_c-z_{c2})-\xi_c\ddot\psi-\eta_c\dot\psi^2\varphi+ \qquad (13)$$

$$+\eta_c\ddot\varphi-\zeta_c\dot\psi^2+2\dot\eta_c\dot\varphi-2\dot\xi_c\dot\psi+\frac{F}{m}),$$

$$\frac{N_3}{m}=\frac{N_4}{m}-l\ddot\varphi-\frac{c}{m}(\eta_c-z_{c2}\varphi)+\xi_c\ddot\psi\varphi+\eta_c\dot\varphi^2+\zeta_c\dot\psi^2\varphi+\zeta_c\ddot\varphi+2\dot\xi_c\dot\psi\varphi+2\dot\zeta_c\dot\varphi-\frac{F}{m}\varphi.$$

Таким образом, в рассматриваемом случае контакта сопрягаемых деталей в двух точках, задача свелась к решению одного дифференциального уравнения:

$$\ddot\xi_c=-\frac{N_3}{m}f\psi-f\frac{N_4}{m}\frac{l\dot\psi+\dot\xi_c}{\sqrt{(l\dot\psi+\dot\xi_c)^2+(r\dot\varphi+\dot\zeta_c)^2}}-\frac{c}{m}(\xi_c+z_{c2}\psi)+\xi_c\dot\psi^2-\eta_c\ddot\psi\varphi-2\eta_c\dot\psi\dot\varphi- \qquad (14)$$

$$-\zeta_c\ddot\psi+2\zeta_c\dot\psi\dot\varphi\varphi-2\dot\psi\dot\zeta_c-2\dot\eta_c\dot\psi\varphi+\frac{F}{m}\psi,$$

При этом координаты центра масс вала η_c и ζ_c определяются по формулам:

$$\begin{cases}\eta_c=-(R-r)+l\varphi,\\ \zeta_c=h+l+r\varphi-Vt.\end{cases} \qquad (15)$$

В результате подстановки соотношений (1) в (15) получим уравнения, характеризующие законы изменения со временем координат η_c и ζ_c центра масс устанавливаемой детали:

$$\begin{aligned}\eta_c&=-(R-r)+lA\cos kt,\\ \zeta_c&=h+l+rA\cos kt-Vt.\end{aligned} \qquad (16)$$

На основании (16) можно определить соответствующие составляющие скорости центра масс вала относительно втулки, а именно:

$$\begin{aligned}V_{c\eta}&=\dot\eta_c=-Alk\sin kt,\\ V_{c\zeta}&=\dot\zeta_c=-(Ark\sin kt+V).\end{aligned} \qquad (17)$$

Из сравнения и следует, что одновременно эти составляющие скорости не могут быть равными нулю. Следовательно, явление заклинивания при рассматриваемом методе сборки, исключено.

Дальнейшее исследование поставленной задачи связано с реализацией построенных математических моделей на компьютере и проведением численного анализа.

Литература

1.*Божкова Л.В., Вартанов М.В., Чуканова О.В., Кольгугин Е.И.* Метод роботизированной сборки с использованием вибрационных колебаний// Сборка в машиностроении, приборостроении, 2006, №9, с. 19-24.

2.*Божкова Л.В., Вартанов М.В., Бакена Мбуа Ж. К.* Совершенствование технологии сборки цилиндрических продольных деталей с применением вибрационных колебаний и пассивной адаптации// Сборка в машиностроении, приборостроении, 2010, №7, с.26-32

3.*Добронравов В.В., Никитин Н.Н.* Курс теоретической механики. – М., Высшая школа, 1983. – 575с.

4. *Коловский М.З., Слоущ А.В.* Основы динамики промышленных роботов. – М., Наука 1988. – 240с.

УДК 621.9.06

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПНЕВМОВИХРЕВЫХ МОДУЛЕЙ СБОРКИ ДЕТАЛЕЙ

Лидия Александровна Казарина, Курбан Зубаилович Габибуллаев,
студенты 4 курса,
кафедра «Технология машиностроения»,
Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)

Научный руководитель: П.Е. Елхов.
кандидат технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»

Одной из главных задач автоматизации сборки должно быть обеспечение ее гибкости, в том числе в массовом и крупносерийном производстве. Операции обработки сложных деталей на станках или станочных линиях требуют около 20…30 с., однако, автоматическая сборка таких деталей выполняется за 2…3 с. Поэтому для быстрой окупаемости затрат на автоматизацию необходимо, чтобы машина собирала несколько разных изделий, т.е. обеспечивала бы групповую или гибкую сборку. Роботы на сборке являются достаточно удачным средством обеспечения гибкости процесса. Однако, чаще всего, они выполняют операции транспортировки деталей, подачи их в рабочую зону и т.д., но не сборку непосредственно.

Вместе с тем опыт показывает, что большую экономическую эффективность дает использование робота для выполнения основных операций взаимной ориентации и соединения деталей. Однако точность позиционирования руки робота должна быть выше, чем точность сопрягаемых деталей. Поэтому нужны новые технологические решения, которые позволят упростить конструкции сборочных машин и при этом повысить качество сборки и их производительность.

Поставленная задача ориентирования будет решена, если станет возможным перемещение материальной точки с монотонно изменяющейся скоростью, из любого положения на поверхности в заданное. Это может быть достигнуто путем колебания поверхности с разными частотами или амплитудой, убывающими или нарастающими в определенном направлении в разных ее точках.

Следовательно, для того, чтобы обеспечить направленное перемещение материальной точки из любого положения на поверхности до определенного, заданного, положения на этой поверхности, необходимо сообщать этой поверхности не традиционно используемые при вибрационном перемещении плоско - параллельные колебания, а колебания качательного характера, т.е. колебания вокруг некоторой горизонтальной оси. Под действием этих колебаний материальная точка будет перемещаться в направлении к этой оси с монотонно убывающей скоростью.

Для того чтобы обеспечить перемещение материальной точки в определенную точку поверхности, следует сообщать этой поверхности колебания вокруг взаимно перпендикулярных осей, пересекающихся в этой точке, причем колебания вокруг одной оси должны быть сдвинуты по фазе относительно колебаний вокруг другой оси (рисунок 1).

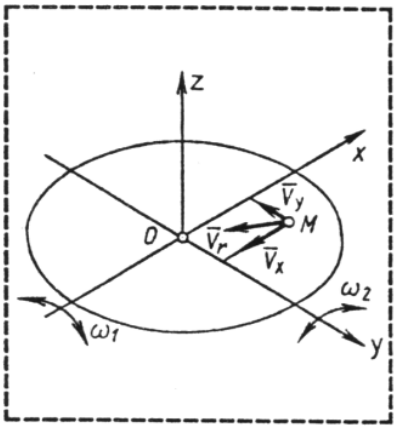


Рисунок 1 - Иллюстрация способа ориентирования с помощью направленных вибраций

Одним из таких решений является применение пневмовихревых модулей. При сборке с помощью модуля деталь 6 подается на плоскость тарелки 4, совершающей сложные движения, которые создаются при подаче воздуха через тангенциальные сопла 1 втулки 2 в зазор между внутренней поверхностью втулки и стержнем 3 (рисунок 2).

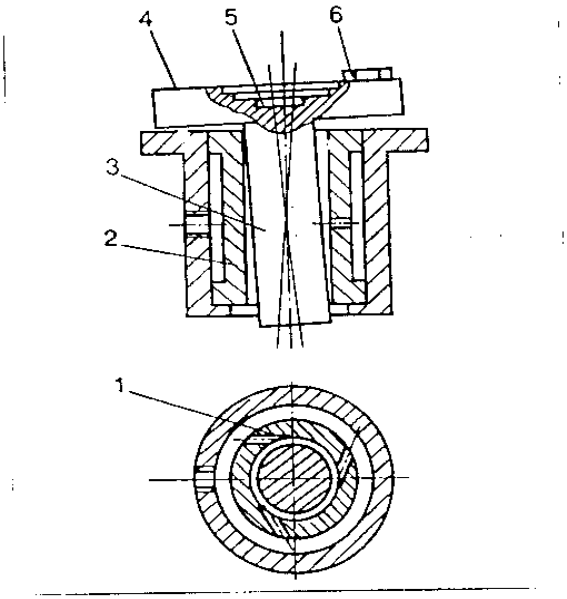


Рисунок 2- Конструкция пневмовихревого модуля.

Практика использования пневмовихревых методов сборки подтвердила их высокую эффективность и надежность. Однако, при использовании этих методов, в первую очередь ориентирующе-сборочных модулей, имели место случаи, когда деталь 6, подаваемая на тарелку 4, совершающую вращательно-колебательные движения, не двигалась к центру, не попадала в предназначенные для неё гнезда 5, а иногда и выбрасывалась за пределы тарелки. Это объяснялось неправильным сочетанием ряда конструктивных параметров модуля, а так же параметров, характеризующих условия его работы. Поэтому весьма актуальным является анализ ориентирующе-сборочных модулей с целью выявления таких значений их параметров, при которых ориентация и сборка деталей происходит со стопроцентной надежностью и, по возможности, за минимальное время *T*. Иными словами, необходимо моделирование процесса пневмовихревой сборки и конструкции пневмовихревых модулей, прежде всего, ориентирующе-сборочных.

Необходимо изучение физики процесса сборки с помощью воздушного вихря, выявление факторов и параметров, оказывающих основное влияние на конечный

результат, с целью управления перемещением, ориентированием и сопряжением деталей. Моделирование процесса пневмовихревой сборки особенно важно на стадии проектирования сборочного оборудования, т.к. изменение параметров процесса после изготовления узлов сборочного оборудования и их предварительного испытания требует много времени и финансовых затрат.

Для изучения движения детали необходимо составление математической модели пневмовихревого модуля, которая позволила бы с достаточной точностью определить области изменения конструктивных размеров модуля и эксплуатационных характеристик (частоты колебаний, зазоров) при которых деталь гарантированно будет перемещаться к центру диска пневмовихревого модуля.

Как показали предыдущие теоретические и экспериментальные исследования, стержень с тарелкой совершает сложные пространственные движения, обусловленные воздушным вихрем и зазорами между стержнем и втулкой.

Для возможности предварительного анализа изменения параметров пневмовихревого метода, заменим сложные пространственные движения стержня, с тарелкой, плоскопараллельным планетарным движением. В качестве расчетной схемы динамической модели примем схему (рисунок 3).

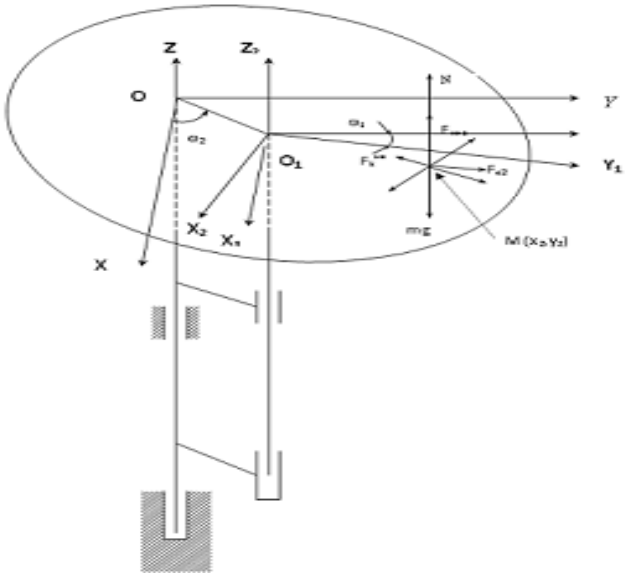


Рисунок 3 - Расчетная схема движения детали по тарелке пневмовихревого метода

Для данной расчетной схемы динамической модели составлена математическая модель, при этом для учета вертикальных колебаний тарелки в точке М будем считать, что на деталь в этой точке будет действовать сила инерции $\overline{F_{инв}}$, которая зависит от условий колебаний.

При решении дифференциальных уравнений математической модели необходимо учитывать, что сила трения является дискретной величиной и зависит от того, перемещается деталь по тарелке или нет. В то время, когда деталь неподвижна относительно тарелки, сила трения равна сумме сил, действующих на деталь в плоскости тарелки, но не больше величины:

$F_{тр} = f_n N$, где

f_n – коэффициент трения покоя (деталь на тарелке неподвижна).

При этом направление силы трения противоположно направлению суммарной силы, действующей в плоскости тарелки на деталь. При условии, когда сумма всех сил, кроме силы трения, становится больше, чем сила трения покоя, деталь начинает перемещаться по тарелке. В этом случае сила трения:

$F_{mp} = fN$, где

f – коэффициент трения.

Сила трения скольжения детали, находящейся в точке М, массой m по тарелке направлена противоположно относительному перемещению детали .

Проекция силы трения на оси координат определяется по зависимостям:

$$F_{mpx} = -fN\frac{V_{2x}}{\sqrt{V_{2x}^2 + V_{2y}^2}}$$

$$F_{mpy} = -fN\frac{V_{2y}}{\sqrt{V_{2x}^2 + V_{2y}^2}}, \text{ где}$$

V_2 – скорость перемещения детали по тарелке.

Сила инерции в вертикальной плоскости определится по зависимости:

$$\overline{F_{инв}} = -mh'' = -ma\theta(\omega_2 + \omega_1)^2 \cos[\frac{\pi}{2} - (\omega_2 t + \omega_1 t + arctg\frac{x_2}{y_2})]$$

Кроме того, в направлении наибольшего наклона тарелки на угол θ (направление OO_1) будет действовать сдвигающая сила, проекции которой на оси координат будут:

$F_{\theta x} = N\theta\cos\omega_2 t$

$F_{\theta y} = N\theta\sin\omega_2 t$.

Для численного решения дифференциальных уравнений движения детали по тарелке пневмовихревого модуля и математического моделирования процесса движения разработана программа для персонального компьютера, позволяющая воспроизводить на дисплее траекторию и вычислять время движения детали по тарелке в зависимости от влияющих на это движение геометрических и динамических параметров.

При численном решении дифференциальных уравнений движения детали по тарелке необходимо знать области изменения частоты ω_2 колебаний тарелки, при которых деталь двигалась бы к центру или вылетала с тарелки.

Учитывая величины сил, действующих на деталь, находящуюся в т. M тарелки, проведем анализ движения детали. Как показали экспериментальные и теоретические исследования при проверке адекватности расчетной схемы пневмовихревого модуля при зазоре между стержнем и втулкой равном 3 мм, диаметре тарелки 120 мм

$\omega_1 = \frac{1}{40}\omega_2$, при меньших зазорах $\omega_1 \le \frac{1}{40}\omega_2$.

Найдем отношение сил инерции при указанных выше размерах:

$\frac{F_{e_2}^{ин}}{F_{e_1}^{ин}} = \frac{m\omega_2^2}{32\cdot 3\cdot m\omega_2^2} = \frac{1}{96}$, что составляет около 1%.

При зазоре 2 мм это отношение будет $\frac{F_{e_2}^{ин}}{F_{e_1}^{ин}} = \frac{1}{144}$, что меньше 1%.

Т.е. без большой ошибки при анализе движения детали по тарелке центробежной силой от вращения диска с угловой скоростью ω_1 можно пренебречь.

Таким образом, при предварительном анализе, для определения границ изменения частоты ω_2 колебаний, при которых возможно движение детали к центру тарелки или отбрасывание детали к периферии, при различных зазорах между стержнем и втулкой, и различных размерах тарелки, а также при изменении коэффициента трения будем считать, что деталь падает на тарелку в точку М без начальной скорости $V_e \approx 0$ вдоль плоскости тарелки, т. е. на деталь не действует в начальный момент кориолисово ускорение.

Поместим деталь в точку M с координатами x_2=0, y_2=a, без начальной скорости V_e=0, при t =0.

В окрестностях точки M на деталь будут действовать сила трения $F_{тр} = Nf$ и силы, сдвигающие деталь

$$F_{сд} = mr\omega_2^2 + (mg - F_{инв})\theta \ ,$$

$$F_{инв} = -ma(\omega_2 + \omega_1)^2 \cos[\frac{\pi}{2} - (\omega_2 t + \omega_1 t) + arctg\frac{x_2}{y_2}]$$

т.к. $\omega_1 << \omega_2$, можно принять, что $\omega_1 = 0$, тогда

$$F_{инв} = -ma\omega_2^{\ 2} \cos[\frac{\pi}{2} - \omega_2 t]$$

При угле поворота $0 < \omega_2 t < \pi$, сила $F_{инв}$ дополнительно прижимает деталь к тарелке, а при угле $\pi < \omega_2 t < 2\pi$ - уменьшает силу прижима.

Деталь будет двигаться к центру при $\pi < \omega_2 t < 2\pi$, тогда при $\omega_2 t = n$,

$$mgf = mr\omega_2^2 + mg\theta \ ,$$

откуда наибольшая угловая скорость тарелки, когда деталь не выбрасывается, определяется по формуле

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{g(f-\theta)}{r}} \ .$$

Наименьшая угловая скорость, при которой деталь движется к центру будет при $\omega_2 t = \frac{3\pi}{2}$, тогда $(mg - ma\theta\omega_2^2) f = mr\omega_2^2 + mg\theta$

Отсюда определится наименьшая угловая скорость тарелки, при которой деталь будет двигаться к центру.

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{g(f-\theta)}{r + af\theta}}, \quad \text{где } \theta = \frac{2r}{l} \ .$$

Так как некоторые специалисты высказывали мнение о том, что деталь при определенных режимах работы может перемещаться к центру с отрывом от тарелки, было также проанализировано, при каких частотах ω_2 возможно подпрыгивание детали на тарелке. Это возможно только в том случае, когда вертикальное ускорение детали будет больше ускорения свободного падения g и направлено вверх.

Рассмотрим условия, при которых деталь будет отрываться (прыгать) от тарелки пневмовихревого модуля. Это осуществимо только в том случае, когда вертикальная сила инерции будет больше mg, т.е.

$$\theta ma(\omega_2 + \omega_1)^2 \cos[\frac{\pi}{2} - (\omega_2 t + \omega_1 t) + arctg\frac{x_2}{y_2}] > mg \ .$$

Учитывая, что $\omega_1 << \omega_2$ и наибольшее значение силы инерции будет при $\cos\alpha = 1$, получим

$$a\theta\omega_2^2 > g \qquad \text{отсюда } \omega_2^2 > \frac{g}{a\theta} = \frac{g}{a\frac{2r}{l}} \ .$$

Рассмотрим траектории движения детали в неподвижной системе координат, соответствующие различным областям частот ω_2 (рисунок 4). Так, на рисунке 4а приведена траектория описываемая деталью, когда она на тарелке неподвижна из-за недостаточной скорости вращения и амплитуды колебаний тарелки.

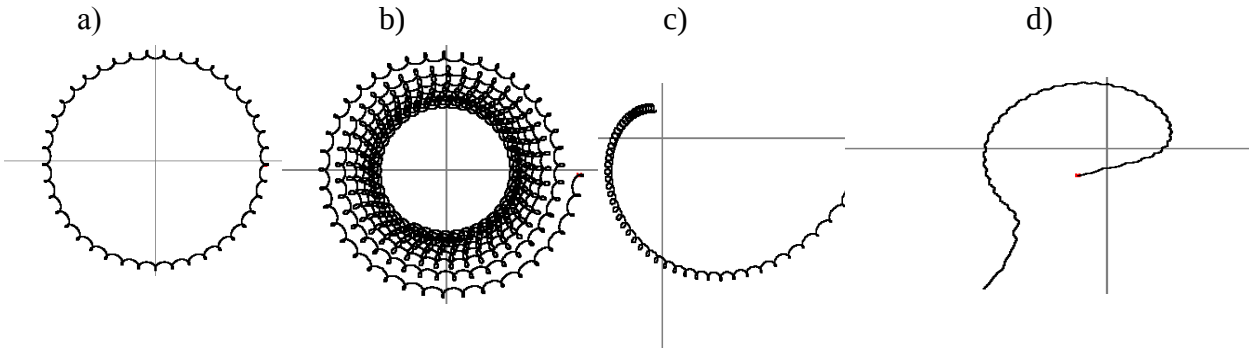


Рисунок 4 - Траектории движения детали по тарелке пневмовихревого модуля:
a - деталь по тарелке не перемещается, b – деталь не достигает центрального отверстия в тарелке, c - деталь попадает в центральное отверстие, d - деталь вылетает с тарелки.

Для проверки адекватности расчетной траектории движения детали по тарелке, воспользуемся результатами экспериментальных исследований траектории движения точки, принадлежащей колеблющейся поверхности тарелки в горизонтальной проекции.

В этих исследованиях, светящаяся точка поверхности тарелки создавалась электрической лампочкой, закрепленной в закрытом корпусе на плоскости тарелки. В корпусе имелось отверстие диаметром 0,1 мм. Проводилась фотосъемка на один кадр перемещения светящейся точки на темном фоне, т.е. в неподвижной системе координат (2). Результаты этих экспериментальных исследований приведены на рисунке 5.

Анализ фотографий подтверждает, что процесс движения стержня во втулке пневмовихревого модуля является установившимся, так как значительных колебаний петель не наблюдается.

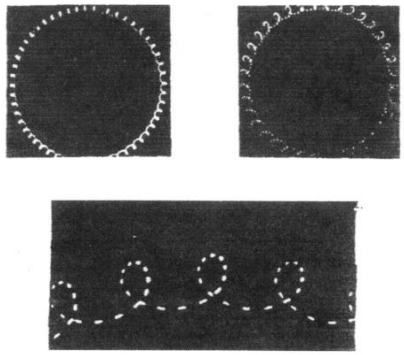


Рисунок 5 - Траектории светящейся точки тарелки ПВМ в неподвижной системе координат (2).

Рисунок 4в. иллюстрирует случай, когда деталь начинает двигаться к центру тарелки, но частота колебаний тарелки ещё недостаточна, чтобы деталь достигла центра.

Траектория движения детали, приведенная на рис рисунке 4с, указывает, что при данной частоте колебаний тарелки, деталь устойчиво перемещается к центру. При больших частотах колебаний тарелки деталь вылетает с неё, даже если деталь попадает на тарелку близко к центру (рисунок 4d).

Моделирование, на электронных вычислительных машинах, процесса пневмовихревой сборки позволило определить время перемещения детали по тарелке к центру при различных параметрах.

Так, на рисунке 6 приведены графики времени перемещения детали, попадающей на тарелку в точке, отстоящей от центра на расстоянии 50 мм при различных коэффициентах трения f. Анализ графиков показывает, что диапазон частот ω_2, при которых деталь стабильно перемещается к центру небольшой. Если частота колебаний

тарелки мала, то деталь может перемещаться длительное время или вообще быть неподвижной на тарелке.

Частоты колебаний большие, чем приведенные на графиках, приводят к выбросу детали с тарелки.

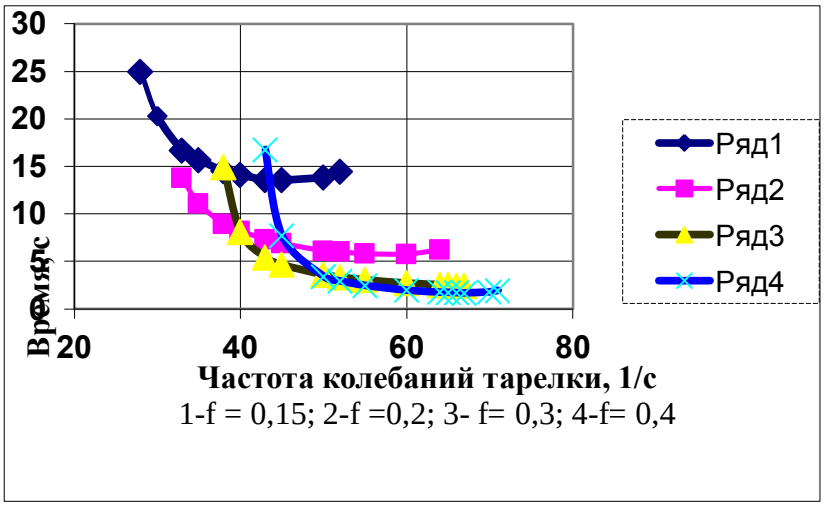


Рисунок 6- Время движения детали по тарелке в зависимости от коэффициента трения.

Рисунок 7 показывает продолжительность перемещения детали по тарелке в области стабильных частот колебаний при различных зазорах между стержнем тарелки и втулкой пневмовихревого модуля.

Анализ графиков показывает, что с увеличением зазоров, т.е. амплитуды колебаний, продолжительность перемещения детали не уменьшается, а уменьшается диапазон частот колебаний, обеспечивающих стабильное перемещение детали к центру.

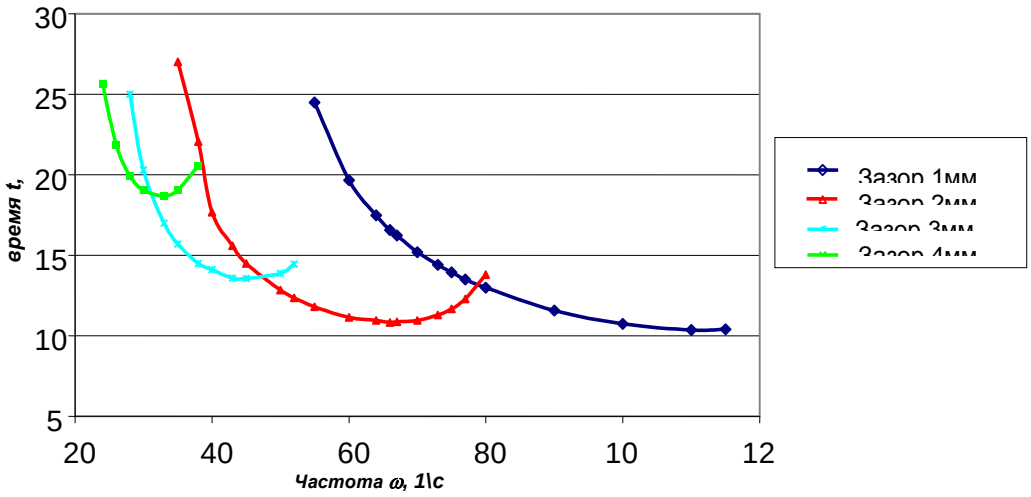


Рисунок 7- Время движения детали по тарелке пневмовихревого модуля в зависимости от зазора между стержнем и втулкой.

По формулам, определяющим диапазоны частот ω_2 колебаний тарелки, были подсчитаны частоты колебаний ω_2 при различных зазорах r и разных коэффициентах трения f при a=50 мм, результаты расчетов представлены на рисунке 8.

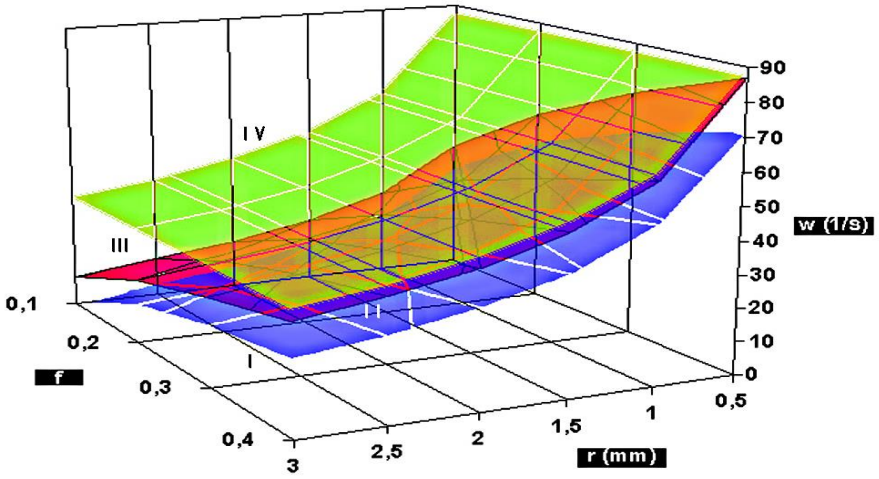


Рисунок 8 - Области допустимых частот колебаний тарелки:
I- деталь по тарелке не перемещается, II- деталь движется к центру,
III - частоты колебаний, при которых возможен выброс детали с тарелки,
IY- деталь вылетает с тарелки с подпрыгиванием.

Анализ графика рисунка 8 показал, что зависимость частоты колебаний ω_2 от зазоров между стержнем и втулкой *r* является гиперболической. Диапазон частот ω_2, при которых возможно движение детали к центру является относительно небольшим и зависит от коэффициента трения.

Результаты расчетов, представленные на том же графике рисунка 8, показали, что частоты ω_2, при которых деталь подпрыгивала бы на тарелке, находятся в диапазоне, когда деталь движется по тарелке от центра.

Опыт эксплуатации сборочного оборудования, основанного на применении нетрадиционной технологии, показал, что, если параметры процесса выбраны правильно, отказы из-за несобираемости деталей практически отсутствуют, т. е., параметрическая надежность такого оборудования является очень высокой.

Литература

1. М.*В. Вартанов, Л. В. Божкова, Е. И. Кольчугин*. Компьютерное моделирование метода роботизированной сборки на основе пассивной адаптации с использованием виброколебаний. журнал Известия МГТУ «МАМИ»№2(4),2007,147-151.
2. *A. Daszczenko, W.Bedrin, O.Daszczenko.* Montaz w zacisku robota, czy ma to uzasadnienie. Technologia i Avtomatyzacja Montazu, N 4, 1997, 8-10.

УДК 621.91.01

ОПТИМИЗАЦИЯ МАРШРУТА ОБРАБОТКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СЛОЖНЫХ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ НА СТАНКАХ ТИПА “ОБРАБАТЫВАЮЩИЙ ЦЕНТР”

Владимир Сергеевич Рувимов,
студент 6 курса,
кафедра «Технология машиностроения»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: И.И. Кравченко
кандидат технических наук, доцент кафедры “Технология машиностроения”

1. Постановка задачи

1.1. Введение

В целях увеличения производительности универсальных станков, путем сокращения вспомогательного времени, они были оснащены ЧПУ; стремление к дальнейшему снижению основного и вспомогательного времени оказало влияние на улучшение конструкций станков и совершенствование систем программного управления. Это позволило обеспечить полную автоматизацию процесса обработки детали на одном станке. Такие станки получили название “обрабатывающие центры” или “многооперационные станки” [1].

В настоящее время в машиностроении осуществляется переход к созданию гибких автоматизированных производств на базе многоцелевых станков. Это позволяет более оперативно реагировать на требования рынка. Значительно более высокая стоимость многоцелевых станков, по сравнению с обычным универсальным оборудованием, обуславливает необходимость обеспечения их более высокой производительности [2].

1.2. Описание технологических возможностей современных многооперационных станков

Многоцелевые станки снабжаются револьверной головкой или специальным инструментальным магазином большой ёмкости (до 140 инструментов), осуществляющим автоматическую установку в шпиндель практически любого инструмента, требуемого для обработки соответствующей поверхности детали. Смена инструмента в шпинделе производится в течение 3-5 секунд.

С помощью программного управления на этих станках осуществляется автоматическое перемещение заготовки вдоль трёх координатных осей и её вращение вокруг вертикальной оси поворотного стола (4 управляемые координаты). В ряде случаев эти станки снабжаются глобусным столом, имеющим, кроме вертикальной, ещё и горизонтальную ось вращения (5 управляемых координат), что делает возможным осуществлять полную обработку сложных корпусных деталей практически за один установ. Единственным видом работ, выполняемым вручную на этих станках, является съем, установка и закрепление заготовки [1].

Технологические возможности обработки на многоцелевых станках чрезвычайно широки: они могут выполнять все виды работ, необходимых при обработке заготовок корпусных деталей. В частности, выполняются всевозможные виды фрезерных работ: фрезерование плоскостей, пазов, внутренних платиков, фрезерование по контуру и т. д. Также выполняются все виды работ, необходимых для обработки отверстий: сверление, рассверливание, зенкерование, растачивание, развертывание, нарезание резьбы, подрезка торцов бобышек, зенкование и т. д. При этом близкое расположение отверстий не является препятствием для обработки [2,3].

1.3. Методы увеличения производительности обработки деталей на многооперационных станках

Время обработки на станке делится на основное и вспомогательное технологическое время. Основные резервы вспомогательного времени на многоцелевых станках выбраны за счет совершенствования систем ЧПУ и программ для них. Дальнейшее повышение производительности возможно за счет применения современных режущих материалов и выбора экономически оптимальных режимов резания. Учитывая высокую стоимость многоцелевых станков, скорость резания должна быть существенно увеличена по сравнению с обычными универсальными станками. Повышенные расходы по инструменту и его более частая смена в инструментальном магазине могут быть перекрыты более высокой производительностью [2].

Существуют пути дальнейшего повышения производительности станков данного типа за счет сокращения вспомогательного времени. При увеличении числа переходов, выполняемых на станке за один установ, вопрос построения оптимального маршрута обработки приобрел особую остроту. Производственные исследования показали, классические методы проектирования маршрута обработки заготовок, применяемые как для обычных станков, так и для станков с ЧПУ, для обрабатывающих центров не в полной мере учитывают их расширенные технологические возможности.

1.4. Методы построения маршрута механической обработки заготовок на многоцелевых станках

Рассмотрим несколько различных методов построения маршрута обработки заготовки на многоцелевом станке [1,2,3]. Предположим, что в корпусной детали имеется сторона, на которой необходимо обработать ряд отверстий (рис. 1). Крепежные отверстия сверлятся и зенкуются, отверстия в торцах сверлятся и в них нарезается резьба. По классической технологии обработка каждого отверстия осуществляется полностью по всем переходам, обеспечивающим требуемую точность размеров и формы. Все переходы выполняются при одном позиционировании детали относительно шпинделя станка. При завершении полной обработки одного отверстия осуществляется перемещение детали для обработки второго и т.д. Очевидно, что такой маршрут не оптимален, так как происходит слишком частая смена инструмента и время на его смену достигает 40% вспомогательного времени.

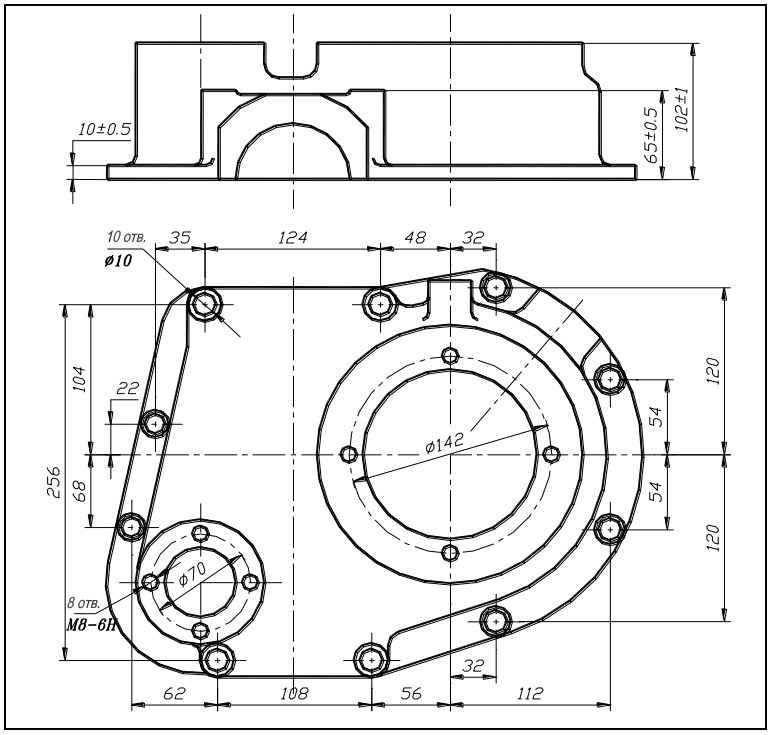


Рис. 1. Эскиз детали

Естественным дальнейшим шагом стала минимизация числа смен инструмента. Этот метод построения операции на многоцелевых станках заключается в разбиении отверстий на группы по диаметру. Сначала одним инструментом по первому переходу обрабатываются все отверстий одной группы, затем - смена инструмента и обработка по второму переходу и т. д. до полной обработки отверстий первой группы. Затем выполняют обработку следующей группы. При этом весь маршрут разбивается на маршруты обработки групп отверстий, которые в свою очередь разбиваются на ряд (по числу переходов) однотипных маршрутов.

Далее необходимо оптимизировать маршрут обработки множества отверстий каждой группы. В качестве целевой функции принимается время холостых перемещений. Требуется определить такую последовательность обработки отверстий в группе, при которой время холостых перемещений будет минимальным (то есть найти маршрут наименьшей протяжённости). Преимущество данного метода заключается в минимизации числа смен инструмента.

В настоящий момент время на смену инструмента в многоцелевых станках достигает 3..5 с., поэтому дальнейшим шагом на пути минимизации вспомогательного времени стала оптимизация всего процесса обработки. Теперь в качестве целевой функции принимается сумма времени холостых перемещений и времени смены инструмента.

1.5. Минимизация вспомогательного времени. Задача коммивояжера. Методы ее решения

Как говорилось выше, оптимизация всего процесса обработки – следующий шаг на пути минимизации вспомогательного времени. Рассмотрим подробнее задачу оптимизации.

На рис. 1 изображена деталь, в которой необходимо получить 18 отверстий. Каждое отверстие обрабатывается по двум переходам (сверление и зенкование или сверление и нарезание резьбы). Всего 18×2=36 переходов, каждый из которых назовем вершиной. Время, необходимое для перехода от одной вершины к другой, называют ребром.

Для существования маршрута обработки детали необходимо найти путь обхода всех вершин, причем посещение вершины возможно только один раз. Для получения оптимального маршрута необходимо минимизировать сумму ребер. Таким образом, задача оптимизации маршрута обработки сводится к известной задаче коммивояжера. Коммивояжер должен побывать в ряде городов. Известно время переезда между каждой парой городов. Необходимо выбрать самый непродолжительный замкнутый маршрут. Так как число возможных маршрутов находится в факториальной зависимости от размерности задачи (числа вершин), то метод полного перебора вариантов для отыскания наилучшего неприменим. Если задачи малых размерностей можно решить опираясь на здравый смысл, то задачи больших размерностей требуют для своего решения строгого и систематического подхода. Аналитическое решение такой задачи не найдено, однако было предложено несколько вычислительных алгоритмов отыскания решения. Итеративный (шаговый) метод решения задачи коммивояжера, предложенный Литтлом, Мерти, Суини и Кэрелом называют также методом ветвей и границ [4]. Идея метода заключается в том, что множество всех допустимых маршрутов разбивается определенным образом на два непересекающихся подмножества и вычисляются оценки каждого из них. Далее подмножество с минимальной оценкой вновь разбивается на два подмножества, и вычисляются их оценки. Оценки вычисляются на каждом шаге, выбирается подмножество с наименьшей из всех полученных до этого шага оценок и разбивка продолжается. В итоге получают подмножество, содержащее один маршрут, который и будет оптимальным [2,4].

1.6. Ограничения, накладываемые технологией на задачу коммивояжера. Принцип Беллмана

Однако, при решении задачи, на этапе составлении матрицы исходных данных, необходимо учитывать технологические ограничения, которые накладываются на классическую симметричную задачу коммивояжера. Так, например, невозможно зенкеровать отверстие, не просверлив его, поэтому ребро перехода от зенкерования к сверлению одного и того же отверстия следует считать бесконечным. Получается несимметричная задача коммивояжера, для решения которой метод ветвей и границ неприемлем.

В МГТУ им Н.Э. Баумана, на кафедре МТ-3, под руководством к.т.н., доцента Кравченко И.И., была проведена работа по построению математической модели. Решение модели основано на принципе Беллмана, который часто применяют для решения технологических сетевых задач.

Принцип Беллмана можно сформулировать следующим образом: “Если некоторая функция качества представлена в виде аддитивного функционала (суммы простых сумм), то конечный участок оптимальной траектории также оптимален” [2,4].

2. Выбор инструмента и технологического оборудования, используемого для обработки заготовки, выбранной в качестве примера

На данном этапе предлагается выбрать достаточно сложную деталь типа “корпус”. Для изготовления этой детали необходимо выбрать технологическое оборудование с ЧПУ для которого имеет смысл оптимизация последовательности переходов и минимизация вспомогательного времени. Затем следует выбрать инструмент для обработки всех поверхностей этой детали. Характеристики оборудования и данные об инструменте необходимы для составления массива исходных данных для оптимизации.

Для примера рассмотрим деталь, представленную на рис.1. Для обработки всех поверхностей этой детали требуется станок с вертикальным расположением шпинделя. Сравнивая существующие отечественные многооперационные станки по критерию минимальной стоимости станкоминуты, выбирается станок 2254ВМФ4, однако, если заменить фрезерование торцев крепежных отверстий ∅12 цекованием, то 2254ВМФ4 можно заменить на более дешёвый сверлильный станок с ЧПУ модели 1А135Ф3.

Для сверления всех необходимых отверстий выбираются свёрла спиральные комбинированные для обработки лёгких сплавов с цилиндрическим хвостовиком (так как обрабатываемые диаметры не превышают 12 мм) средней серии по ГОСТ19543-74. Для сверления крепежных отверстий сверло ∅12; для сверления отверстий под резьбу - сверла ∅7.25 и ∅ 11. Для цекования применяется цековка ∅20.

Для нарезания резьб выбираются короткие машинные метчики с шейкой для метрической резьбы М8 и М12 по ГОСТ3266-81 [3].

3. Составление маршрутов обработки, согласно правилам построения маршрутов обработки для многоцелевых станков. Расчет вспомогательного времени

На основе правил, рассмотренных в пункте 1.4, составим маршруты обработки. При расчетах вспомогательного времени скорость холостых перемещения при позиционировании рабочего органа выбранного станка по всем координатам принималась равной 12000 мм/мин, а время, затрачиваемое автооператором на смену инструмента - 5 секунд. В таблице 2.1. указана нумерация каждого перехода. Это условное обозначение необходимо сравнения вариантов маршрутов обработки, а также для заполнения матрицы переходов.[2]

Таблица 2.1.

Обозначим:

Переходы	Обработка
1...10	Сверление ∅12Н14
11...20	Цекование ∅12Н14
21...24	Сверление ∅7.25

25...28	Нарезание резьбы М8
29...32	Сверление ∅11
33...36	Нарезание резьбы М12

Вариант, при котором каждое отверстие обрабатывается полностью по всем переходам при одном позиционировании рабочего органа, представлен в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Минимизация числа позиционирований.

Номер по порядку	Переходы	Номер по порядку	Переходы	Номер по порядку	Переходы
1	**1**	13	**7**	25	**30**
2	**11**	14	**17**	26	**34**
3	**2**	15	**8**	27	**29**
4	**12**	16	**18**	28	**33**
5	**3**	17	**9**	29	**23**
6	**13**	18	**19**	30	**27**
7	**4**	19	**10**	31	**24**
8	**14**	20	**20**	32	**28**
9	**5**	21	**32**	33	**21**
10	**15**	22	**36**	34	**25**
11	**6**	23	**31**	35	**22**
12	**16**	24	**35**	36	**26**
Суммарное вспомогательное время с учётом смены инструмента : **186** сек.					

Далее составляется вариант маршрута обработки, например, сначала одним инструментом сверзят все отверстия ∅12, затем - смена инструмента и цекование этих отверстий, затем - смена инструмента - сверление следующей группы и т.д. При этом происходит минимизация количества смен инструмента и суммарное вспомогательное время существенно сокращается по сравнению с предыдущим вариантом. Маршрут и суммарное вспомогательное время для этого варианта представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Минимизация числа смен инструмента.

Номер по порядку	Переходы	Номер по порядку	Переходы	Номер по порядку	Переходы
1	**1**	13	**13**	25	**25**
2	**2**	14	**14**	26	**26**
3	**3**	15	**15**	27	**27**
4	**4**	16	**16**	28	**28**
5	**5**	17	**17**	29	**29**
6	**6**	18	**18**	30	**30**
7	**7**	19	**19**	31	**31**

8	**8**	20	**20**	32	**32**
9	**9**	21	**21**	33	**33**
10	**10**	22	**22**	34	**34**
11	**11**	23	**23**	35	**35**
12	**12**	24	**24**	36	**36**
Суммарное вспомогательное время с учётом смены инструмента : **48** сек.					

4. Составление матрицы переходов. Подготовка данных для работы с ЭВМ

Согласно условию задачи коммивояжера, описанному в пункте 1.6. известно расстояние между каждой парой вершин. Поэтому составляется квадратная матрица со стороной равной числу переходов (в нашем случае 36). В ячейках указывается суммарное время перемещения шпинделя станка от позиции I (номер строки) к позиции J (номер столбца) и смены инструмента (если требуется). Расстояние между обработками берутся с чертежа детали, а скорость холостых перемещений в паспорте станка.

При составлении матрицы переходов следует учитывать ограничения, накладываемые технологией на классическую симметричную задачу коммивояжера. Эти ограничения были рассмотрены в пункте 1.6.

В таблице 2.5. показан фрагмент матрицы исходных данных, необходимых для оптимизации маршрута обработки детали, показанной на рис. 1. Нулем в данном случае обозначено ребро бесконечной длины - запрещенный переход.

Таблица 2.5. Фрагмент матрицы переходов

№ пер.	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**
1	0	11,3	14,7	16,3	17,4	22,6	23,2	20,8	16,1	5,5	50	61,3	64,7	66,3
2	11,3	0	4,5	11,5	14,8	24,6	26,6	25,7	21,9	15,7	61,3	50	54,5	61,5
3	14,7	4,5	0	7	11,5	21,6	24,8	25,7	22,7	27,6	64,7	54,5	50	57
4	16,3	11,5	7	0	6,2	12,8	20,6	22,4	21,3	13,9	66,3	61,5	57	50
5	17,4	14,8	11,5	6,2	0	6,7	14,6	17,4	18	16,1	67,4	64,8	61,5	56,2
6	22,6	24,6	21,6	12,8	6,7	0	10,4	18,3	20,6	22,4	72,6	74,6	71,6	62,8
7	23,2	26,6	24,8	20,6	14,6	10,4	0	10,5	18,2	19,7	73,2	76,6	74,8	70,6
8	20,8	25,7	25,7	22,4	17,4	18,3	10,5	0	10,4	7,2	70,8	75,7	75,2	72,4
9	16,1	21,9	22,7	21,3	18	20,6	18,2	10,4	0	7,2	66,1	71,9	72,7	71,3
10	5,5	15,7	27,6	13,9	16,1	22,4	19,7	7,2	7,2	0	55,5	65,7	67,6	63,9
11	50	61,3	64,7	66,3	67,4	72,6	73,2	70,8	66,1	55,5	0	11,3	14,7	16,7
12	61,3	50	54,5	61,5	64,8	74,6	76,6	75,7	71,9	65,7	11,3	0	4,5	11,5
13	64,7	54,5	50	57	61,5	71,6	74,8	75,2	72,7	67,6	14,7	4,5	0	7
14	66,3	61,5	57	50	56,2	62,8	70,6	72,4	71,3	63,9	16,7	11,5	7	0

5. Работа с вычислительными машинами

5.1. Программа, реализующая алгоритм решения задачи коммивояжера

На основе алгоритма, реализующего принцип Беллмана (смотри пункт 1.6.), были написаны программа Bellman, Bellman 2.0 и некоторые дополнительные сервисные модули.

5.2. Методы эффективной работы с программой и уменьшения трудоемкости ввода исходных данных для оптимизации

Рассмотрим подробнее приемы работы и возможности этого Windows-приложения: При запуске исполняемого файла Bellman 2.0.exe на экране появляется окно, которое, как и окно любого другого приложения, можно свернуть, развернуть во весь экран или изменить его геометрию так, как это будет удобно пользователю. Под заголовком окна расположено главное меню, состоящее из четырех пунктов, позволяющих выполнять все действия, необходимые для создания, редактирования, сохранения и считывания матрицы переходов. Ниже находятся кнопки для удобства работы с основными пунктами меню, указатели текущей размерности матрицы и текущей позиции курсора. В рабочем поле окна расположены две таблицы, содержащие матрицы возможных начал и окончаний технологического процесса и матрицу переходов. По умолчанию размерность матрицы 1×1. Заполнение матрицы может производится вручную по данным матрицы переходов или с помощью модуля, формирующего матрицу по данным, полученным с чертежа детали.

Перед началом заполнения матриц вручную необходимо задать размерность решаемой задачи. Для этого в меню “Файл” выбирается пункт “Размерность” и в появившемся диалоговом окне указывается размерность задачи в диапазоне от 1 до 1000 переходов (в нашем случае 36). При этом в рабочем поле окна появляются пустые таблицы, указанной размерности. Если размер таблиц превышает размеры рабочего поля окна, то на нижней и правой границе рабочего поля появляются полосы прокрутки. Доступ к любой части таблицы может осуществляться как с помощью клавиш управления курсоров, так и с помощью полос прокрутки.

Время в ячейки таблицы нужно вводить в секундах с точностью до одного знака после запятой. Например, чтобы ввести время перехода с 21-й вершины на 1-ю (53,0 секунды), нужно курсор перенести в позицию 21:01 с помощью стрелок или указателя мыши. При установке курсора в ячейку таблицы он принимает вид маски ввода “___,_”. Маска ввода настроена таким образом, что пользователь не сможет ввести других символов, кроме цифр и десятичной запятой. Ввод при этом может осуществляться как с основной, так и с дополнительной клавиатуры - при русской или английской раскладке клавиатуры. Это позволяет снизить количество ошибок при заполнении матрицы. Нулевое значение, например позиция 11:1, обозначает технологический запрет, то есть такой переход невозможен. Значения, расположенные на главной диагонали матрицы, например позиция 5:5, не подлежат редактированию и установлены нулевыми, поскольку по условию задачи каждая вершина посещается один раз.

Для правильной работы программы необходимо, также, указать возможные начала и окончания технологического процесса обработки детали. Это делается следующим образом: необходимо переместить указатель мыши в соответствующую ячейку таблиц начал и окончаний и щелкнуть левой кнопкой мыши. Повторный щелчок снимет отметку. Возможен также случай, когда технологический переход может являться одновременно и началом и концом техпроцесса. Такие переходы помечаются двумя отметками.

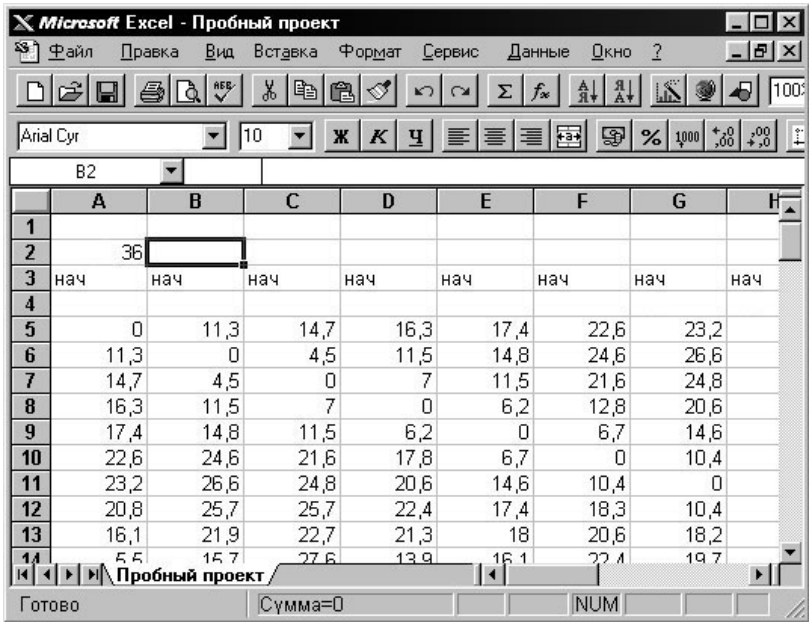
Сохранение матрицы осуществляется выбором пункта “Сохранить” или “Сохранить как...” в меню “Файл”, щелчком мыши по соответствующей кнопке на панели управления или нажатием комбинации клавиш (таблица 3.1.). При этом появляется стандартное диалоговое окно, позволяющее сохранить файл на любой локальный или сетевой диск. По умолчанию файл имеет расширение “.mtr”.

Таблица 5.1. “Горячие” клавиши

№	Действие	Комбинация клавиш при раскладке клавиатуры	
		Русской	Английской
1	Открыть файл	Alt-Н	Alt-N

2	Сохранить файл	Alt-C	Alt-S
3	Сохранить файл как...	Alt-К	Alt-A
4	Печатать...	Alt-П	Alt-P
5	Установить размерность...	Alt-Р	Alt-D
6	Открыть MS Excel	Alt-E	Alt-E
7	Запустить сервисный модуль	Alt-M	Alt-M
8	Тестировать	Alt-T	Alt-T
9	Оптимизировать	Alt-O	Alt-O
10	Помощь	Alt-X	Alt-H

По желанию пользователя матрица переходов может заполняться в MS Excel. Написав соответствующий макрос можно значительно сократить объем работ. Для запуска MS Excel, если такая программа установлена на компьютере, в меню “Сервис” имеется пункт “Запустить Excel”. После заполнения матрицы она сохраняется как форматированный текст и это файл может быть открыт из программы Bellman 2.0. Формат файла, содержащего матрицу перехода, создаваемого Bellman 2.0, совместим с форматом Excel, что позволяет работать с одним файлом в обоих программах (см. рис. 2).



	A	B	C	D	E	F	G
1							
2	36						
3	нач	нач	нач	нач	нач	нач	нач
4							
5	0	11,3	14,7	16,3	17,4	22,6	23,2
6	11,3	0	4,5	11,5	14,8	24,6	26,6
7	14,7	4,5	0	7	11,5	21,6	24,8
8	16,3	11,5	7	0	6,2	12,8	20,6
9	17,4	14,8	11,5	6,2	0	6,7	14,6
10	22,6	24,6	21,6	17,8	6,7	0	10,4
11	23,2	26,6	24,8	20,6	14,6	10,4	0
12	20,8	25,7	25,7	22,4	17,4	18,3	10,4
13	16,1	21,9	22,7	21,3	18	20,6	18,2
14	5,5	15,7	27,6	13,9	16,1	22,4	19,7

Рис. 2. Заполнение матрицы переходов в MS Excel

Еще один альтернативный способ формирования матрицы переходов предоставляет пользователю модуль заполнения матрицы по данным, полученным с чертежа детали. Запустить данный модуль можно выбрав пункт “Ввод данных с чертежа” из меню “Сервис”. Далее предлагается выбрать файл, содержащий параметры оборудования из библиотеки, либо определить их вручную, т. е. создать файл библиотеки, в котором будут содержаться некоторые технические характеристики многоцелевого станка, на котором будет обрабатываться заготовка корпусной детали.

Задав число обрабатываемых элементарных поверхностей, пользователь для каждой из них вводит диаметр (или протяженность, если обработка плоскости), квалитет, число переходов для получения заданной точности обработки и координаты. Этой информации достаточно для заполнения матрицы переходов. Применение данного модуля сокращает время формирования матрицы переходов на 40…50%.

5.3. Оптимизация. Получение оптимального маршрута и минимального вспомогательного времени обработки детали

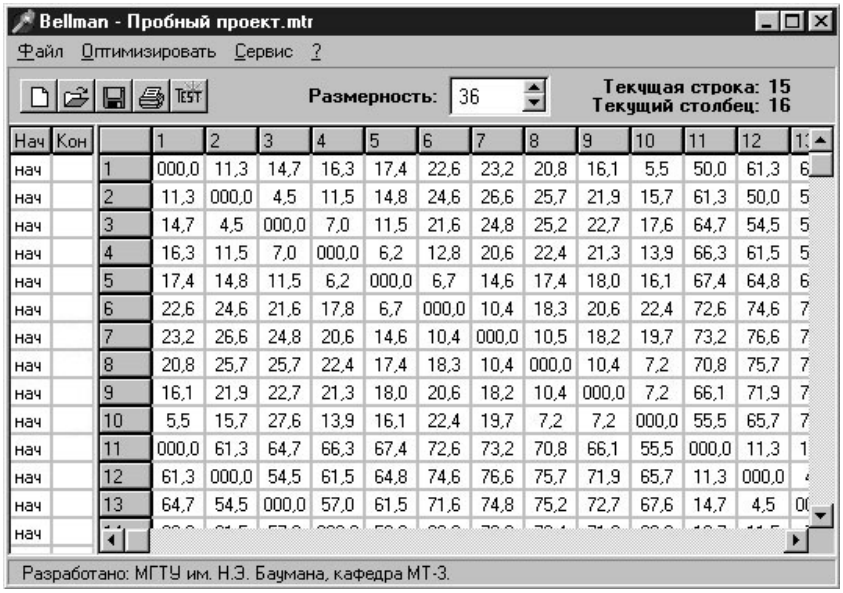


Рис. 3. Исходные данные для оптимизации

После окончания заполнения матрицы (рис. 3) из меню “Оптимизировать” выбирается пункт “Начать” для того, чтобы запустить процесс оптимизации. При этом на экране появляется окно с индикатором выполнения процесса. Если матрица заполнена неверно или не полностью, то оптимизация прервется и появится окно с сообщением об ошибке. После успешного окончания процесса оптимизации появляется окно, в котором показывается оптимальная последовательность переходов и суммарное время холостых перемещений и смены инструмента (рис. 4).

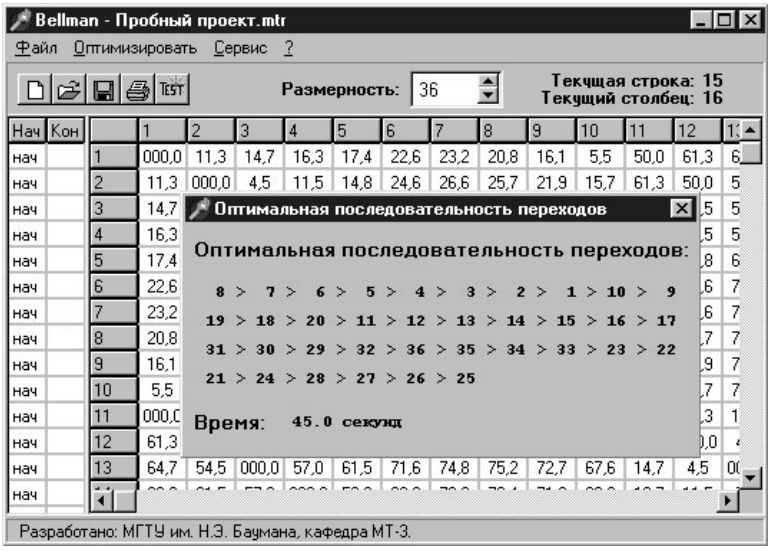


Рис. 4. Результат оптимизации

6. Выводы

Результаты работы программы Bellman 2.0 сведены в таблицу 4.1. Анализируя данные, представленные в таблицах 2.2, 2.3 и 4.1, становится видно, что изо всех вариантов маршрута обработки вариант, полученный с помощью программы оптимизации имеет минимальное суммарное вспомогательное время. Очевидно, что при оптимизации обработки более сложных деталей с большим числом элементарных поверхностей, расположенными в разных плоскостях выигрыш по времени составит больший процент, чем в рассмотренном примере. Тем не менее, даже оптимизируя обработку достаточно простой детали, рассмотренной в примере, уменьшение суммарного вспомогательного

времени с учетом смены инструмента составит около 6%. Учитывая высокую стоимость станкоминуты работы многооперационных станков, следует признать, что незначительные затраты на стадии технологической подготовки производства по оптимизации программ для этих станков легко перекроются этой экономией. Также наметились тенденции интегрирования подобных оптимизационных программ в “тяжелые” пакеты автоматизированного проектирования.

Таблица 4.1. Оптимальная последовательность переходов.

Номер по порядку	Переходы	Номер по порядку	Переходы	Номер по порядку	Переходы
1	**8**	13	**20**	25	**36**
2	**7**	14	**11**	26	**35**
3	**6**	15	**12**	27	**34**
4	**5**	16	**13**	28	**33**
5	**4**	17	**14**	29	**23**
6	**3**	18	**15**	30	**22**
7	**2**	19	**16**	31	**21**
8	**1**	20	**17**	32	**24**
9	**10**	21	**31**	33	**28**
10	**9**	22	**30**	34	**27**
11	**19**	23	**29**	35	**26**
12	**18**	24	**32**	36	**25**
Суммарное вспомогательное время с учётом смены инструмента : **45** сек.					

Литература

1. Технология машиностроения: учебн. для вузов: в 2т. / ; под ред. А.М. Дальского, А.И. Кондакова. – 3-е изд., испр. и перераб. –М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.
2. Автоматизированная система проектирования технологических процессов механосборочного производства/В. М. Зарубин, Н. М. Капустин, В. В. Павлов, Г. П. Старовойтов, В. Д. Цветков. — М.: Машиностроение, 1979. — 247 с., ил.
3. Справочник технолога машиностроителя. В 2т. / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К.Мещерякова. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2001. Т.1. — 912 с.; Т.2. 944с.
4. Акоф Р., Сасиени М. Основы исследования операций/ Пер. с англ. М., Мир, 1999. - 536 с.

УДК 624.04

РАСЧЁТ ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КЕРАМИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ БЛОКА ШЕСТЕРЁН МУЛЬТИПЛИКАТОРА АВИАЦИОННОГО ГТД

Елена Андреевна Исаева [(1)], Дмитрий Андреевич Исаев [(2)],
магистр 2 года [(1)], аспирант 2 года[(2)],
кафедра «Машины и технологии обработки металлов давлением» им. И.А. Норицына,
Московский Государственный Машиностроительный Университет (МАМИ)
ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют»

Научный руководитель: Е.В. Крутина,
доцент, к.т.н., кафедра «Машины и технологии обработки металлов давлением» им. И.А. Норицына

Для увеличения ресурса мультипликатора был разработан блок шестерён с керамическим подшипником скольжения (рисунок 1). Проведен расчёт динамического состояния керамического подшипника скольжения блока шестерён мультипликатора авиационного газотурбинного двигателя (ГТД) для определения форм и частот собственных колебаний.



Рис. 1. Блок шестерён с керамическим подшипником скольжения

В настоящее время для анализа динамических характеристик элементов конструкций широко применяют численные методы и прежде всего метод конечных элементов (МКЭ).

Современные комплексы программ, в которых используется МКЭ, позволяют получать приближенные численные решения при расчете конструкций на статические и динамические нагрузки для широкого класса материалов с различными механическими характеристиками и поведением. Расчет конструкций на статические нагрузки может производиться с учетом физической и геометрической нелинейности, температурных полей, взаимодействия с другими средами. Производится расчет критических нагрузок, при которых конструкция или ее элементы теряют устойчивость, поведения конструкции после потери устойчивости.

МКЭ позволяет также определить нагрузки, при которых происходит разрушение конструкции. Учитываются такие свойства материала как анизотропность, нелинейная

упругость, пластичность, текучесть. Учитываются виды геометрической нелинейности: большие деформации и большие перемещения.

Основными динамическими задачами являются: расчет собственных колебаний конструкции; динамический отклик на нагрузку, зависящую от времени; распространение волн.

В данной работе использовался программный комплекс ANSYS, который позволяет производить модальный анализ - один из методов определения форм и частот собственных колебаний. Модальный анализ является важной частью любого динамического анализа, он позволяет оценить динамическое поведение объекта.

Собственные (или свободные) колебания совершаются при отсутствии внешних сил. Это наиболее естественные движения конструкции. Они являются важнейшей характеристикой линейных систем.

Общее уравнение движения:

$[M] \cdot \{\nu''\} + [C] \cdot \{\nu'\} + [K] \cdot \{\nu\} = [P(t)]$,

где [K] – матрица жёсткости тела;

[M] – его матрица масс;

[C] – матрица демпфирования;

$\{\nu\}$ – вектор узловых перемещений;

$\{\nu'\}$ – вектор узловых скоростей;

$\{\nu''\}$ – вектор узловых ускорений;

[P(t)] – вектор внешних узловых сил, которые являются функциями времени.

Уравнения собственных колебаний является частным случаем уравнения движения:

$[M] \cdot \{\nu''\} + [K] \cdot \{\nu\} = 0$,

В анализе свободных колебаний предполагается упругое поведение конструкции, поэтому ожидаемый отклик является гармоническим:

$\{\nu\} = \{\nu_0\} \cdot \cos \omega t$;

$\{\nu''\} = - \{\nu_0\} \cdot \omega^2 \cdot \cos \omega t$.

В результате получим:

$(-[M] \cdot \omega^2 + [K]) \cdot \{\nu_0\} = 0$

Процедура анализа сводиться к следующему:

- построение геометрической модели;
- задание свойств материалов;
- назначение контактных условий;
- выбор опции расчета;
- вид анализа;
- метод вычисления форм и частот собственных колебаний;
- записать полученные формы колебаний в файл результатов;
- просмотреть результаты с помощью постпроцессора.

Расчетная модель блока шестерен строилась средствами препроцессора ANSYS. Использовалась твердотельная модель. Для разбиения на конечные элементы использовался тип КЭ 20-узловой 3-х мерный квадратичный элемент Solid95.

Блок шестерен состоит из двух шестерен (количество зубьев z_1=18 и z_2=37), соединенных валиком. Закрепление модели блока шестерён (рисунок 2) выполнено в месте посадки шарикового подшипника в радиальном и тангенциальном направлениях, а в месте посадки подшипника скольжения – в радиальном направлении. Фиксация в осевом направлении выполнена по буртику упора шарикового подшипника и по торцу блока шестерен со стороны подшипника скольжения.

Для построения частотной диаграммы расчет ЧСК блока шестерен выполнен для случаев:

– n=0 об/мин;

– n=12000 об/мин (максимальная частота вращения).

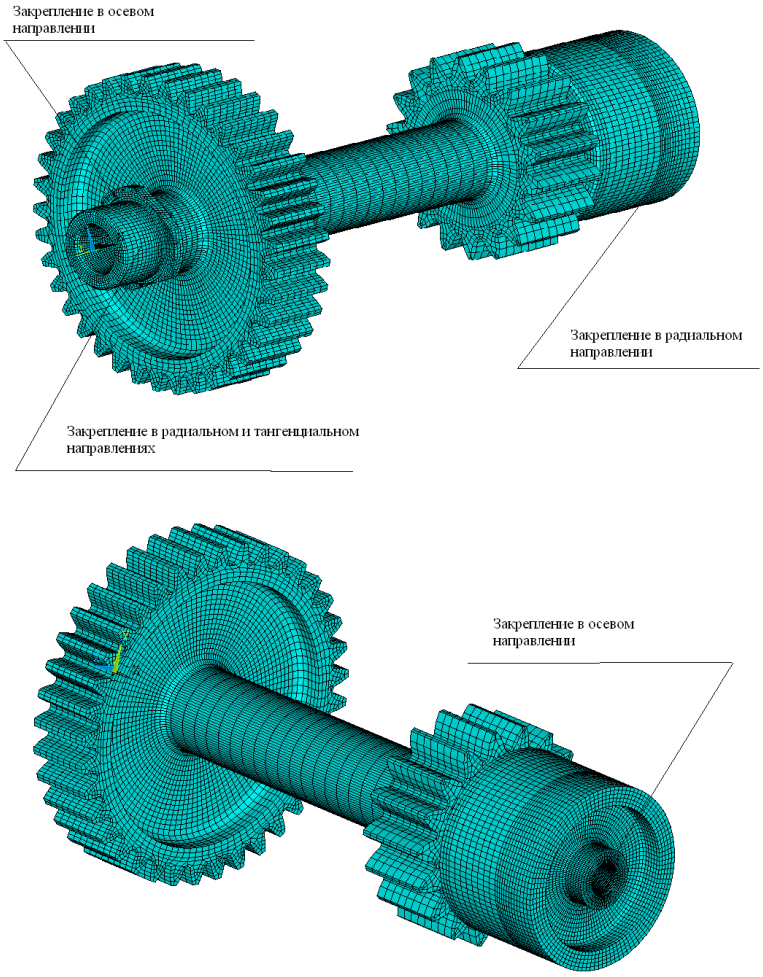


Рисунок 2 – Расчётная модель блока шестерён.

Закрепление модели

Результаты ЧСК и соответствующие им формы колебаний блока шестерен приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчёта форм и частот собственных колебаний

ЧСК f, Гц		Форма частот собственных колебаний
n=0 об/мин	n=12000 об/мин	
1301,9	1293,9	Сдвиг
2189,5	2198,1	1 узловой диаметр
2645,8	2645,6	Крутильные колебания
3495,3	3498,8	Зонтичные колебания
4359,4	4356,5	Изгиб валика
4954,5	4962,7	2 узловых диаметра
6723	6721,2	Изгиб валика (2 форма)
7992,8	7992,9	Сдвиг

Формы частот собственных колебаний показаны на рисунке 3.

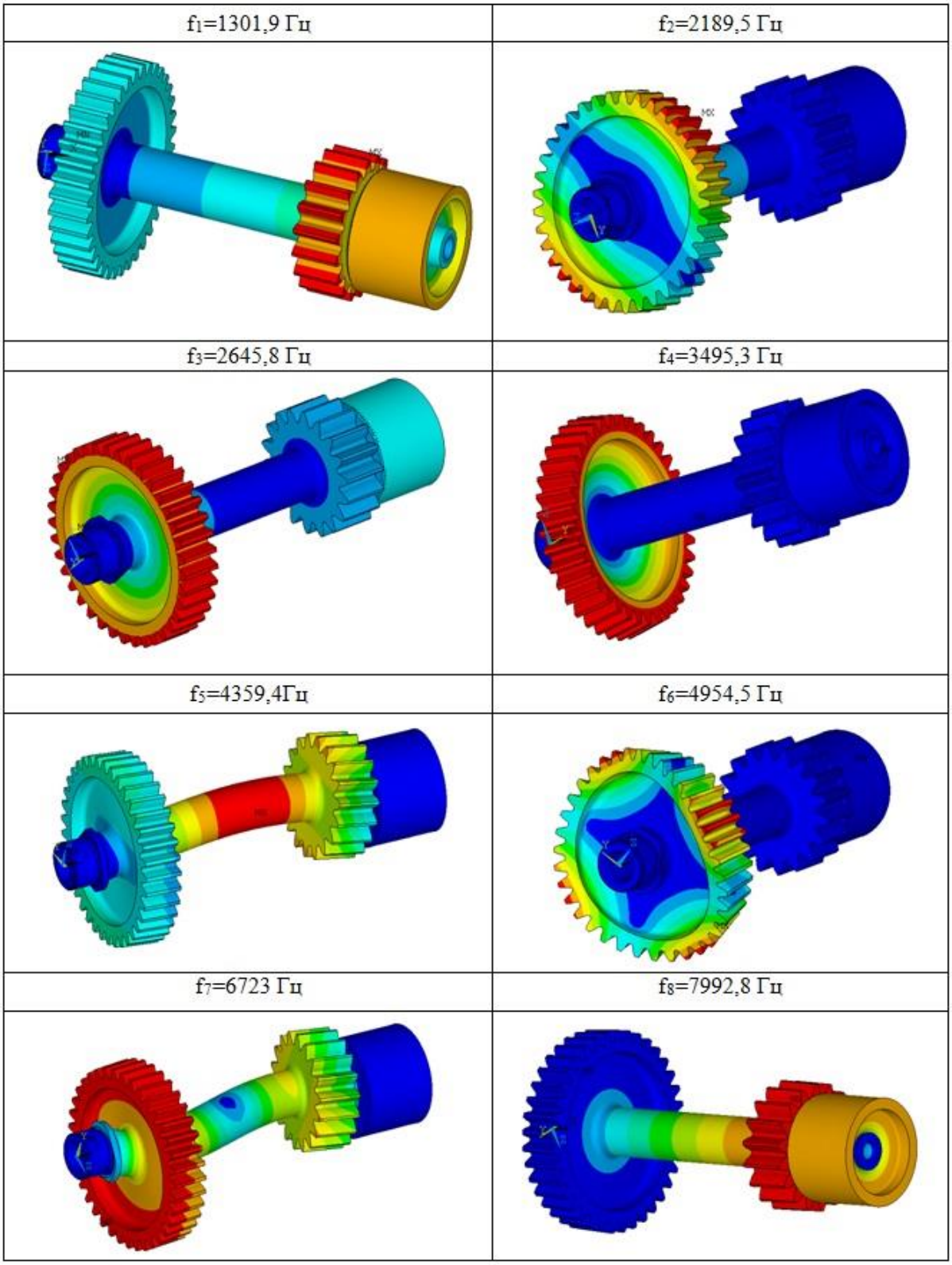


Рис. 3. Формы частот собственных колебаний

По результатам расчета ЧСК построена диаграмма Кэмпбелла (рисунок 4).

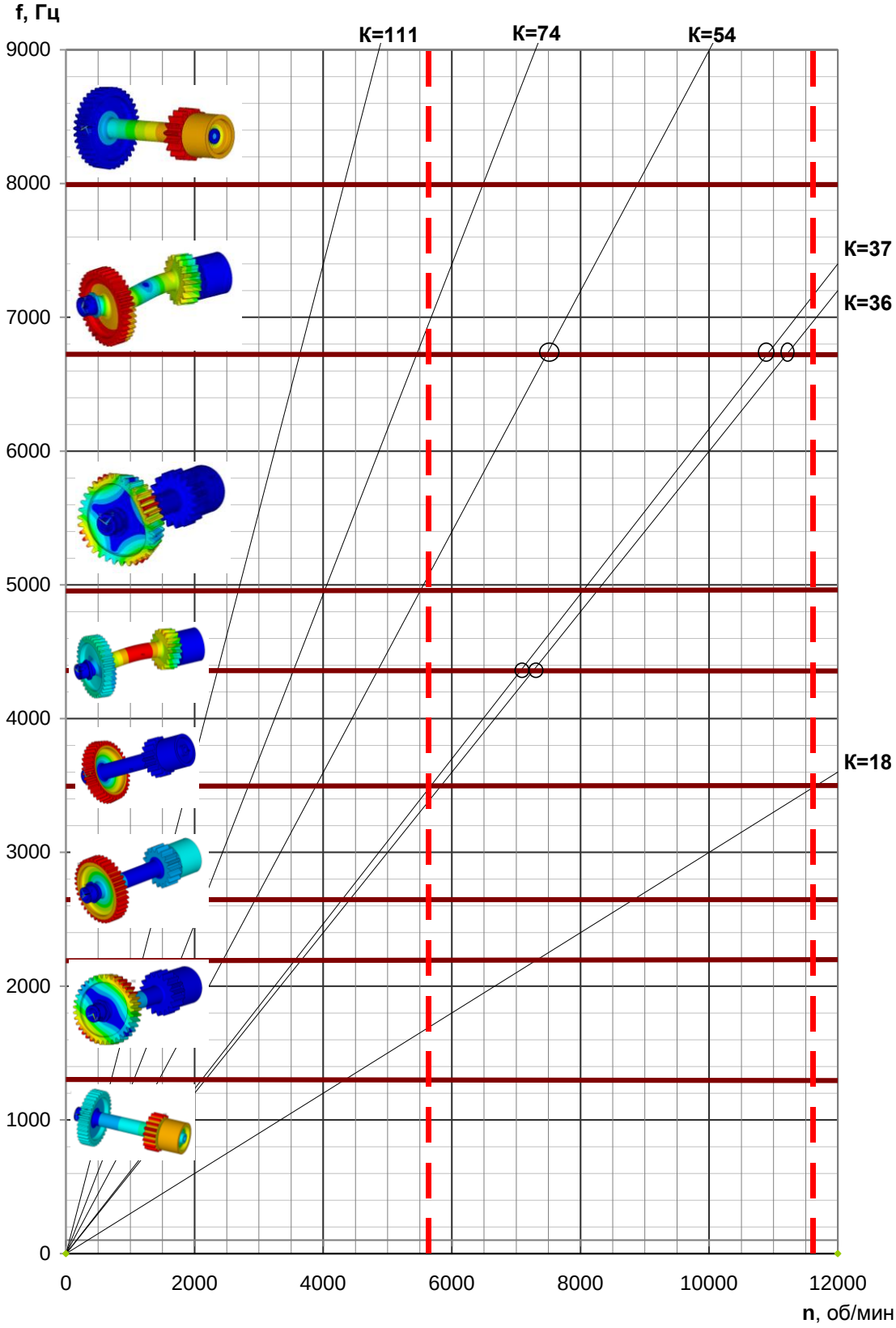


Рис. 4. Диаграмма Кэмпбелла

В рабочем диапазоне 5639...11616 об/мин (50...103% $n_{РВД}$) лежат следующие формы собственных колебаний блока шестерен, которые могут влиять на работоспособность подшипника скольжения:

а) f_5=4359,4 Гц – изгиб валика при частотах вращения блока шестерен:

– n=7100 об/мин с кратностью k=37, соответствующей количеству зубьев большей шестерни;

– n=7300 об/мин с кратностью k=36, соответствующей удвоенному количеству зубьев меньшей шестерни.

б) f_7=6723 Гц – вторая изгибная форма колебаний валика при частотах вращения блока шестерен:

– n=7490 об/мин с кратностью k=54, соответствующей утроенному количеству зубьев меньшей шестерни;

– n=10900 об/мин с кратностью k=37, соответствующей количеству зубьев большей шестерни;

– n=11250 об/мин с кратностью k=36, соответствующей удвоенному количеству зубьев меньшей шестерни.

Литература

1. Молчанов И.Н., Николенко Л.Д. Основы метода конечных элементов. Киев: Наукова Думка, 1989. 272 с.
2. Хечумов Р.А., Прокопьев В.И. Применение метода конечных элементов к расчету конструкций. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 1994. 353 с.
3. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах. М.: КомпьютерПресс, 2002. 224 с.

УДК 21.865.8.004:658.52

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УЧАСТКОВ

Руслан Рубенович Асатуров, Юрий Олегович Потяшин, Николай Юрьевич Челюканов,
студенты 6 курса,
кафедра «Технологии машиностроения»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Ю.И. Усачев,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии машиностроения»

Производственные участки механосборочных цехов представляют собой сложные системы, состоящие из достаточно большого количества оборудования, имеющего различную организационную структуру. Особый интерес представляют автоматизированные участки, при проектировании которых целесообразно выявить «узкие» места и определить резервы повышения производительности за счет перераспределения грузопотоков и оптимизации технологического процесса. Для предварительного анализа работы автоматизированных участков используются различные виды моделей, к числу которых относятся:

— аналитические;
— сетевые;
— имитационные.

Аналитическая модель включает в себя совокупность математических объектов и отношений между ними. Из-за большой размерности входящих в модель объектов в неё вводят ряд допущений. Это обуславливает приблизительный характер получаемых результатов.

Сетевой моделью называют модель, отражающую комплекс работ и событий, связанных с реализацией некоторого производственного процесса в их логической и технологической последовательности и связи. Сетевые модели используются для предварительной оценки работы производственного участка.

Имитационные модели (англ. simulation models) – один из основных классов математического моделирования. Целью имитаций является максимальное приближение модели к конкретному объекту и достижение максимальной точности его описания.

Применительно к анализу производственных систем и участков имитационное моделирование позволяет на этапе проектирования минимизировать время обработки; увеличить коэффициент использования оборудования; уменьшить объем незавершенного производства.

Рассмотрим решение производственной задачи, реализуемое с помощью программного продукта Tecnomatix Plant Simulation. Имеется автоматизированный участок, на котором обрабатываются детали типа тела вращения шести наименований с заданными значениями оперативного времени. Обработка деталей выполняется на трех группах оборудования (токарная, фрезерная, шлифовальная).

Общее количество станков в системе в соответствии с предварительными расчетами было принято равным четырем (с учетом моечной машины). На основе предварительно разработанной планировки намечена структура участка, размерные связи между соответствующими элементами системы.

Данные по трудоёмкости обработки деталей на этих станках представлены в табл.1.

Таблица 1. Данные по трудоёмкости обработки

Деталь	Станки			Размер партии, шт; Тп-з, мин
	Токарный	Фрезерный	Шлифовальный	
	Тш,мин	Тш,мин	Тш,мин	
Кольцо	21,4	12	29,3	Размер партии, 25 Тп-з, 60
Обойма	15,4	40,5		
Фланец	14,2		17,4	
Крышка	16,8	45,5		
Диск		16,5	34	
Стакан	32		19,2	

Согласно применяемому программному продукту имитационная модель реализуются с использованием блочного принципа, позволяющего всю моделируемую систему разбить на ряд подсистем, связанных между собой обобщенными взаимодействиями и допускающими самостоятельное моделирование с применением своего собственного математического аппарата. Такой подход позволяет также достаточно просто конструировать новые имитационные модели, путем замены отдельных блоков.

В качестве блоков могут выступать склады, накопители, станки и т.д.

Имитационная модель рассматриваемого участка включает в себя следующие блоки:

— источник деталей
— токарный станок
— фрезерный станок
— шлифовальный станок
— моечная машина
— склад готовых изделий

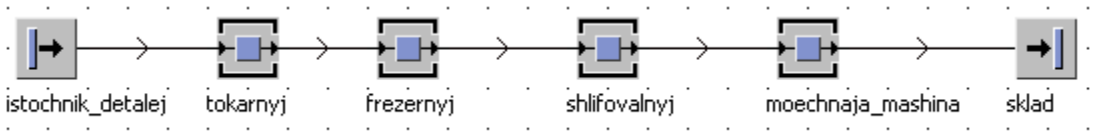


Рис.1. Модель участка механической обработки

Стрелки между отдельными блоками обозначают направление грузопотока.

Результаты моделирования, представленные в интерфейсе программы, приведены в табличной форме на рис. 2 и в виде гистограмм на рис. 3.

Статистика ресурсов - Статистика ресурсов

Доли состояний во время сбора статистики

Объект	Работа	Переналадка	Ожидание	Блокировка	Остановлен	Отказал	Пауза	Перерыв	Начало сбора статистики	Часть
tokarnyj	43.06%	6.21%	0.50%	50.23%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0000	
frezernyj	49.40%	6.21%	17.27%	27.12%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0000	
shlifovalnyj	43.10%	6.21%	50.34%	0.35%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0000	
moechnaja_mashina	25.89%	0.00%	74.11%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.0000	

Свойства материалопотока

Объект	Входов ПО	Выходов ПО	Хранил минимум	Хранил максимум	Relative Empty	Relative Full	Относительная занятость без перерывов	Относительная занятость с перерывами
tokarnyj	150	150	0	1	0.50%	-	99.50%	99.50%
frezernyj	150	150	0	1	17.27%	-	82.73%	82.73%
shlifovalnyj	150	150	0	1	50.34%	-	49.66%	49.66%
moechnaja_mashina	150	150	0	1	74.11%	-	25.89%	25.89%

Рис. 2. Окно «Статистический отчет»

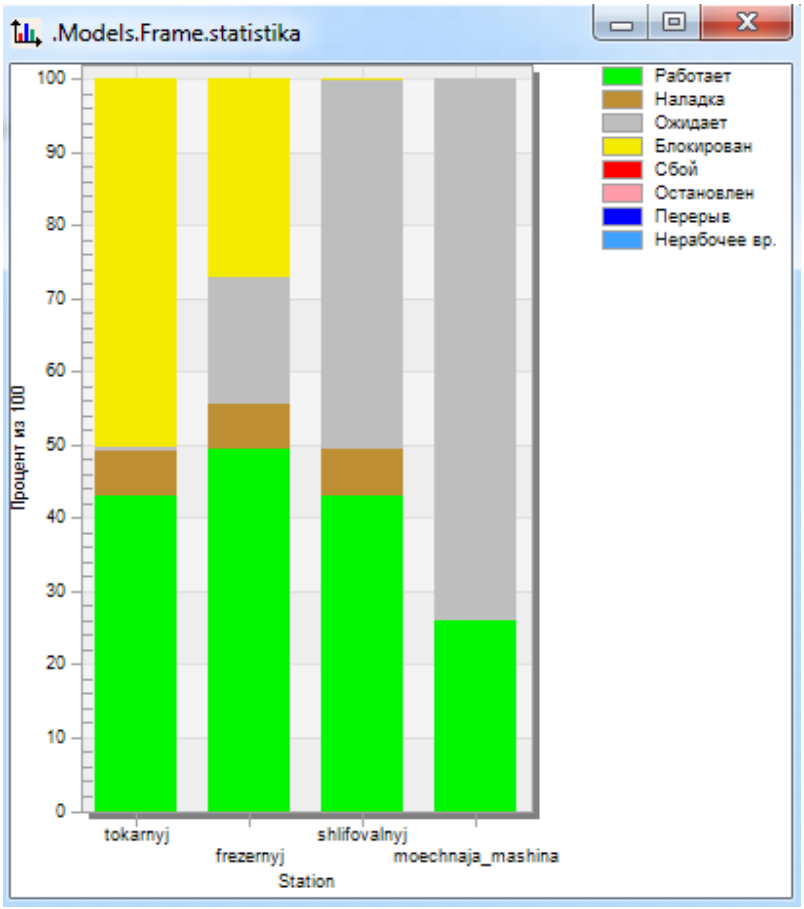


Рис. 3. Графическое представление результатов моделирования

На основании полученных данных можно заключить, что токарный станок находится в работе 43,06% от общего времени моделирования, время его переналадки составляет 6,21 %, время ожидания составляет 0,5 %, время блокировки –50,23%; фрезерный станок находится в работе 49,40% от общего времени моделирования, время

его переналадки составляет 6,21 %, время ожидания составляет 17,27 %, время блокировки – 27,12%.

Часовая производительность работы участка приведена на рис. 4.

Накопленная статистика деталей, уничтоженных стоком

Объект	Работа	Переналадка	Ожидание	Остановлен	Отказал	Пауза	Среднее время жизни	Среднее время выхода	Общая выработка	Выработка в час	Выработка в день
sklad	45.26%	5.22%	49.52%	0.00%	0.00%	0.00%	2:17:48.3200	37:11.7181	150	5531166	.274798

Рис. 4. Производительность участка

Для корректной интерпретации полученных результатов моделирования, определим понятия ожидания, блокировки и простоя:

ожидание – состояние объекта, при котором он не может приступить к работе по причине отсутствия предмета производства (например, ожидание станка при отсутствии детали);

блокировка – состояние объекта, при котором он не может приступить к работе по причине невозможности передачи предмета производства на следующий объект (станок не имеет возможности начать обрабатывать новую деталь, так как уже обработанная на нем деталь еще не передана на следующий станок);

простой = ожидание + блокировка.

Проанализировав гистограмму рис. 3, можно сделать вывод, что для повышения производительности участка необходимо уменьшить время простоев станков. В нашем случае время блокировки станков соизмеримо со временем обработки деталей, для чего целесообразно установить накопители после токарного и фрезерного станков. Это позволит более полно использовать возможности оборудования.

Так как в данном программном продукте реализован блочный принцип построения производственной системы, то добавление в существующую модель новых элементов не осложняет процесса модификации модели.

Оптимизированная модель участка с накопителями представлена на рис. 5.

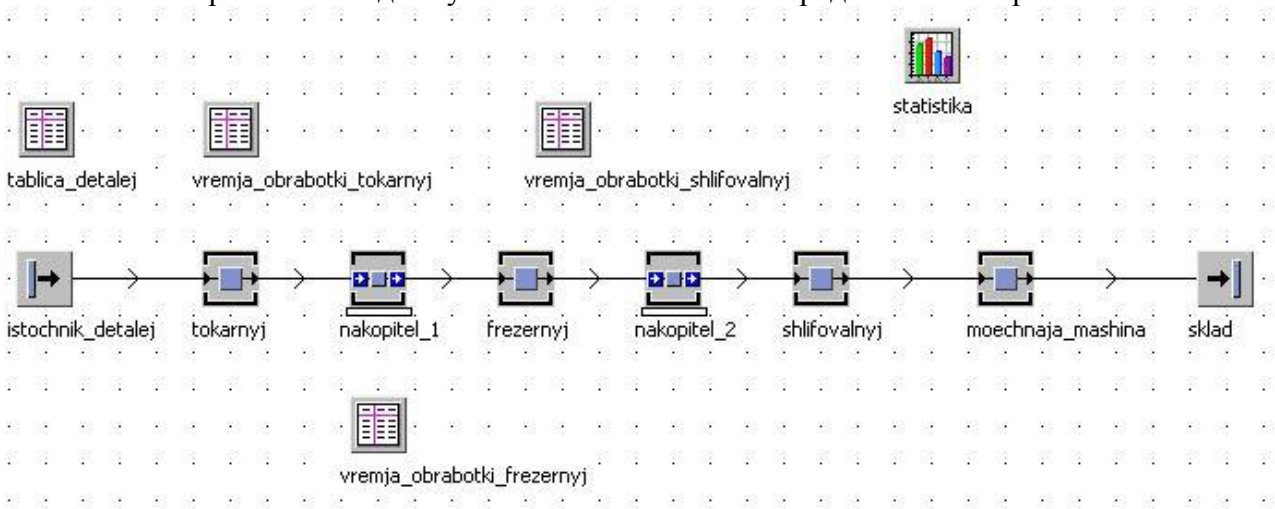


Рис. 5. Оптимизированная модель

Важнейшей характеристикой накопителей является их вместимость. Поэтому установка накопителей приводит к новой задаче – определению их ёмкости. Необходимо найти оптимальный вариант, позволяющий обеспечить сочетание максимальной производительности участка и минимальной площади накопителей.

В работы проведено моделирование работы участка при различных значениях емкости накопителей (5…55шт) с фиксацией времени работы, ожидания и блокирования станков. После каждого цикла моделирования получена статистика состояний объектов во

время работы (рис. 6), из которой для анализа выбраны относительное время работы, ожидания и блокировки.

Доли состояний во время сбора статистики

Объект	Работа	Переналадка	Ожидание	Блокировка	Включение/выключение	Отказал	Остановлен	Пауза	Перерыв	Часть
tokarnyj	49.63%	7.16%	1.73%	41.48%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
frezernyj	56.94%	7.16%	5.76%	30.13%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
shlifovalnyj	49.68%	7.16%	42.16%	0.99%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	

Рис. 6. Статистика состояний объектов во время работы

Результаты сведены в таблице 3. В столбце «простои» записаны значения, полученные как сумма относительных времен блокировки и ожидания.

Таблица 3. Сводная таблица полученных результатов

	Работа, %		Блокирован, %		Ожидает,%		Простои,%	
Емкость каждого из накопителей,шт.	Токарный	Фрезерный	Токарный	Фрезерный	Токарный	Фрезерный	Токарный	Фрезерный
5	49,63	56,94	41,48	30,13	1,73	5,76	43,21	35,89
10	51,54	59,14	33,05	22,98	7,96	10,44	41,01	33,42
15	52,49	60,22	30,09	19	9,85	13,2	39,94	32,2
20	53,47	61,34	27,02	15,44	11,8	15,5	38,82	30,94
25	54,99	63,09	21,16	9,26	15,91	19,71	37,07	28,97
30	54,99	63,09	17,59	5,51	19,48	23,46	37,07	28,97
35	54,99	63,09	14,06	1,76	23,01	27,21	37,07	28,97
40	54,99	63,09	10,53	0	26,54	28,97	37,07	28,97
45	54,99	63,09	7,01	0	30,06	28,97	37,07	28,97
50	54,99	63,09	2,2	0	34,87	28,97	37,07	28,97
55	54,99	63,09	0	0	37,07	28,97	37,07	28,97

На основании данных таблицы 3 построены графики зависимости времени работы, блокировки, ожидания и простоев от ёмкостей накопителей (рис. 7 и рис. 8).

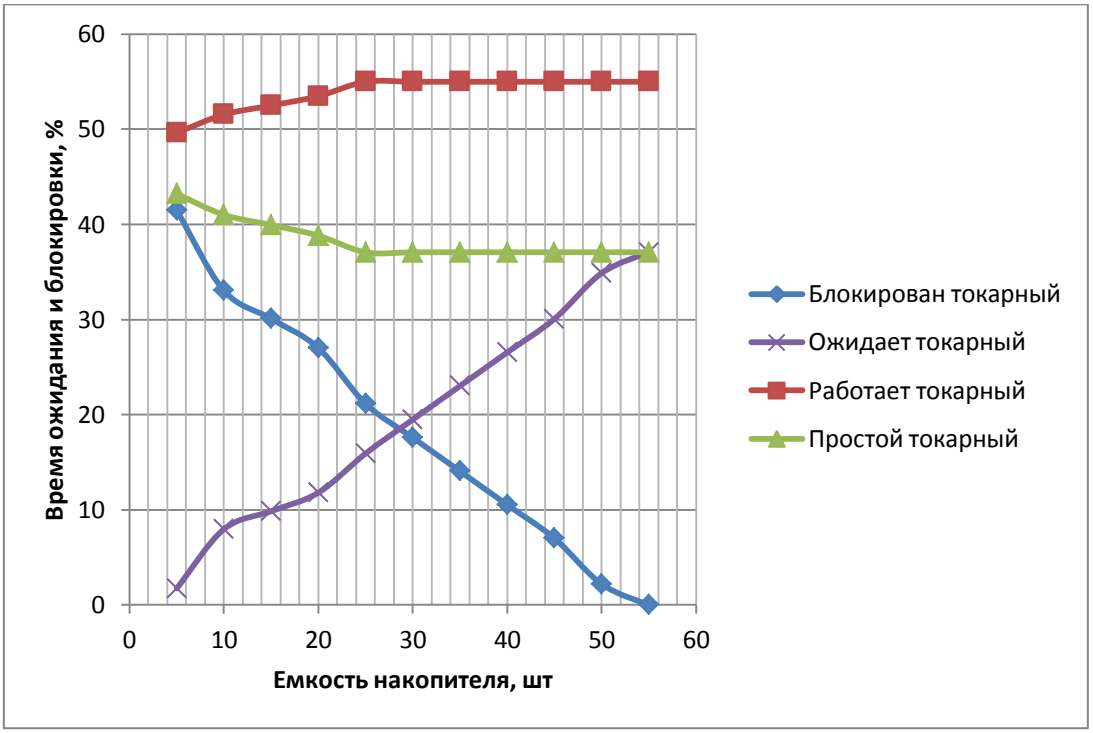


Рис. 7. График зависимости времени ожидания и блокировки токарного станка от емкости накопителя

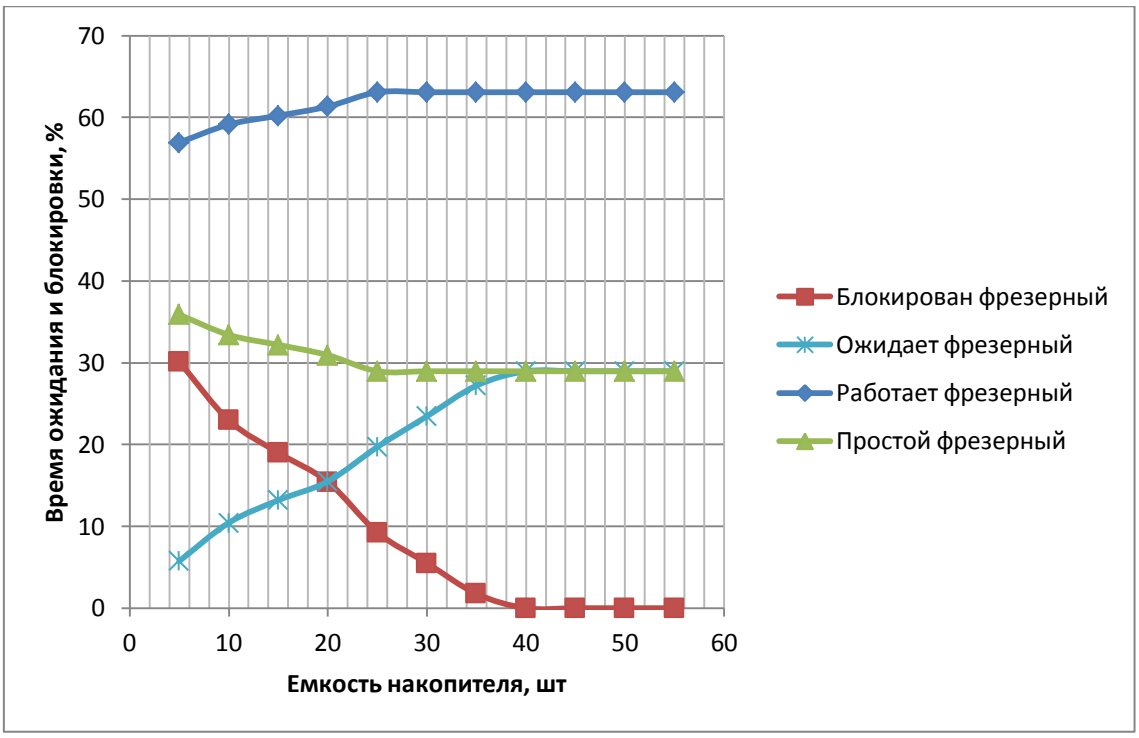


Рис. 8. График зависимости времени ожидания и блокировки фрезерного станка от емкости накопителя

Как видно из рис. 7 и рис. 8, максимальное относительное время работы и минимальное относительное время простоя станков достигается при значении емкостей накопителей в 25 шт. При этом время простоев токарного станка снижается на 14,16%, фрезерного станка – на 15,42%. Производительность участка составила 1,9837 шт/час.

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы о работе автоматизированного участка:

1) Выявлена необходимость включения накопителей в производственную линию между токарным и фрезерным, фрезерным и шлифовальным станками;

2) Установка накопителей позволит сократить время простоев токарного станка на 14,16%, фрезерного станка – на 15,42%;

3) Оптимальная емкость накопителя №1 и №2 составляет 25 шт.

4) После оптимизации производительность механического участка возрастёт на 27,7%;

Предложенный анализ работы производственных участков может быть использован при проведении лабораторных работ по курсу «Проектирование цехов механосборочного производства».

Литература

1. Steffen Bangsow. Manufacturing Simulation with Plant Simulation and SimTalk Usage and Programming with Examples and Solutions. — Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. — ISBN 978-3-642-05073-2
2. Сырецкий Г.А. Моделирование систем: лабораторный практикум. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – Ч.3. – 38с.

УДК 621.9.06

ГРУППОВАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ

Михаил Юрьевич Шариков [(1)], Георгий Юрьевич Горбатенков [(2)],
студенты 4 курса[(1)],
кафедра «Технология машиностроения»,
Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)

Научный руководитель: И.В. Бухтеева,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения»

Применение высокопроизводительного оборудования с использованием станков с ЧПУ позволяет создавать гибкие производственные системы в условиях серийного производства, предназначенного для групповой обработки деталей. Главная особенность такого оборудования – возможность его переналадки путем быстрой смены программ и элементов групповой технологической оснастки, что позволяет обрабатывать различные группы деталей без больших потерь времени на переналадку.

Групповая технология поставила ряд задач по увеличению эффективности серийного производства. К ним относится классификация деталей, группирование их в соответствии с принятой системой кодирования, выбор последовательности обработки деталей в каждой группе и определение оптимального числа запусков каждой группы деталей на обработку.

В основу разработки переналаживаемого оборудования и автоматической системы инструментального обеспечения для обработки группы деталей типа крышек, колец, сепараторов, фланцев (всего 25 наименований) была положена общность их по конструктивно-технологическим признакам и технологическому процессу обработки. В частности, общность диаметров и углов расположения крепежных отверстий, диаметров выточек под головки болтов, размеров резьб, материала, а также общность технологических операций: в большинстве случаев выполняются сверление, зенкерование, снятие фасок, нарезание резьбы.

При группировании деталей с целью уменьшения числа подгрупп была проведена унификация отдельных конструктивных элементов, оказывающих влияние на условия групповой обработки, например, унифицированы диаметры расположения крепежных отверстий.

В результате унификации 25 наименований деталей были сгруппированы в восемь подгрупп (таблица 1).

Таблица 1

Подгруппы	Число деталей в подгруппе	Унифицированный диаметр, мм
$П_1$	1	60
$П_2$	3	65
$П_3$	3	74 (120)
$П_4$	7	122
$П_5$	6	110 (60) (200)
$П_6$	1	110 (185)
$П_7$	1	196
$П_8$	3	230
Примечание: В скобках указаны размеры расположения крепежных отверстий у деталей, входящих в подгруппу, но находящихся на концентрических окружностях разных диаметров.		

Разработка группового технологического процесса велась для сверлильного станка с ЧПУ 2Р135Ф2 с автоматической револьверной головкой на шесть инструментов, автоматизированным перемещением координатного стола и с инструментальным магазином. Салазки крестового стола перемещаются по горизонтальным направляющим основания, а верхняя часть стола – по направляющим салазок.

Отдельные подгруппы деталей объединялись меду собой посредством условной комплексной детали, на которую ориентировалась программы последовательности выполнения требующихся по ходу обработки переходов: сверления, зенкования, зенкерования, развертывания, нарезания резьбы, цекования. Наличие инструментального магазина, многопозиционной револьверной головки для автоматической смены режущего инструмента и крестового стола позволило создать инструментальные наладки для координатной обработки всех 25 наименований групп деталей типа крышек, колец, сепараторов и фланцев без предварительной разметки и применения кондукторов. На рисунке 1 в качестве примера показана условная комплексная деталь для первой группы деталей. На ее основе разработана программа выполнения всех переходов для обработки 12 наименований деталей. На ее основе и разработана схема многошпиндельной насадки (рисунок 2), предназначенной для обработки 12 наименований деталей.

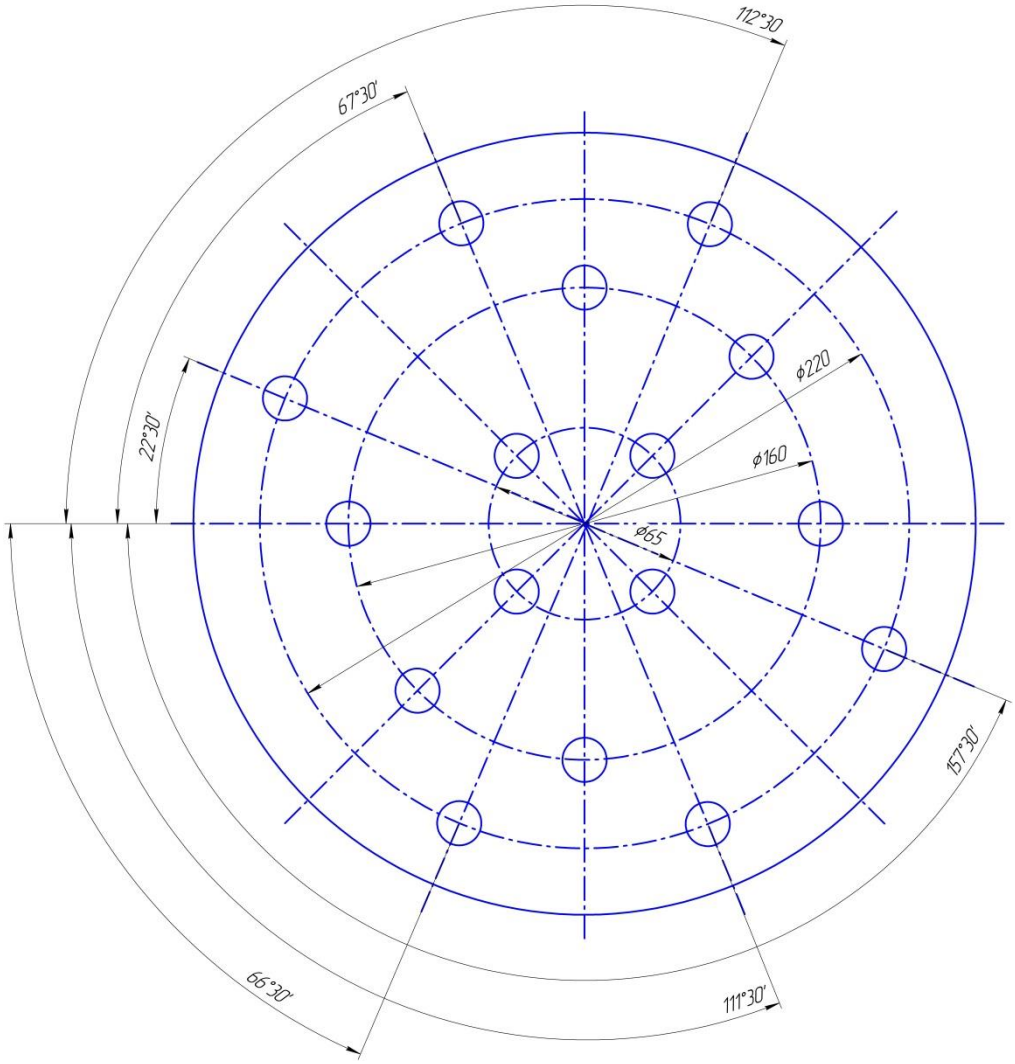


Рисунок 1. Условная комплексная деталь

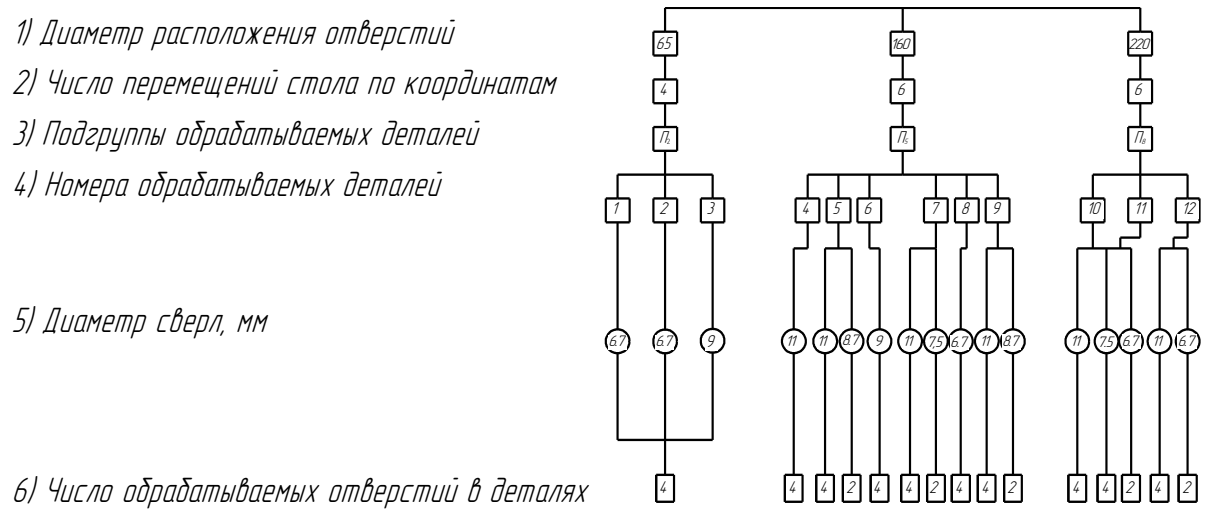


Рисунок 2. Схема многошпиндельной насадки

Как видно из рисунков, первую группу для обработки составили детали из подгрупп $П_2$, $П_5$ и $П_6$. У них обрабатываются отверстия, расположенные на концентрических окружностях с диаметрами 65, 160 и 220 мм. Позиционное ЧПУ позволяет автоматически установить сверлильный шпиндель по осям x и y для обработки отверстий на указанных диаметрах, число перемещений стола при этом будет равно 4,6 и 6, что соответствует числу обрабатываемых отверстий в деталях.

Аналогичным образом, исходя из числа и условного расположения обрабатываемых отверстий в деталях, сконцентрированных в подгруппы, разработаны условные комплексные детали и программы обработки последующих групп деталей. Число перемещений стола и их траектория, повороты револьверной головки определялись, исходя из числа выполняемых технологических переходов и их распределения по группам обработки.

Критерием оценки разработанных программ обработки представленных групп деталей является минимизация перемещений координатного стола и поворотов револьверной головки с целью уменьшения величины вспомогательного времени при обработке.

Полученное распределение деталей по числу перемещений стола по координатам и радиусам смещения шпинделя в радиальном направлении на столе станка показано на рисунке 3. Из него видно, что для обработки 25 наименований деталей необходимо восемь программ переналадок станка.

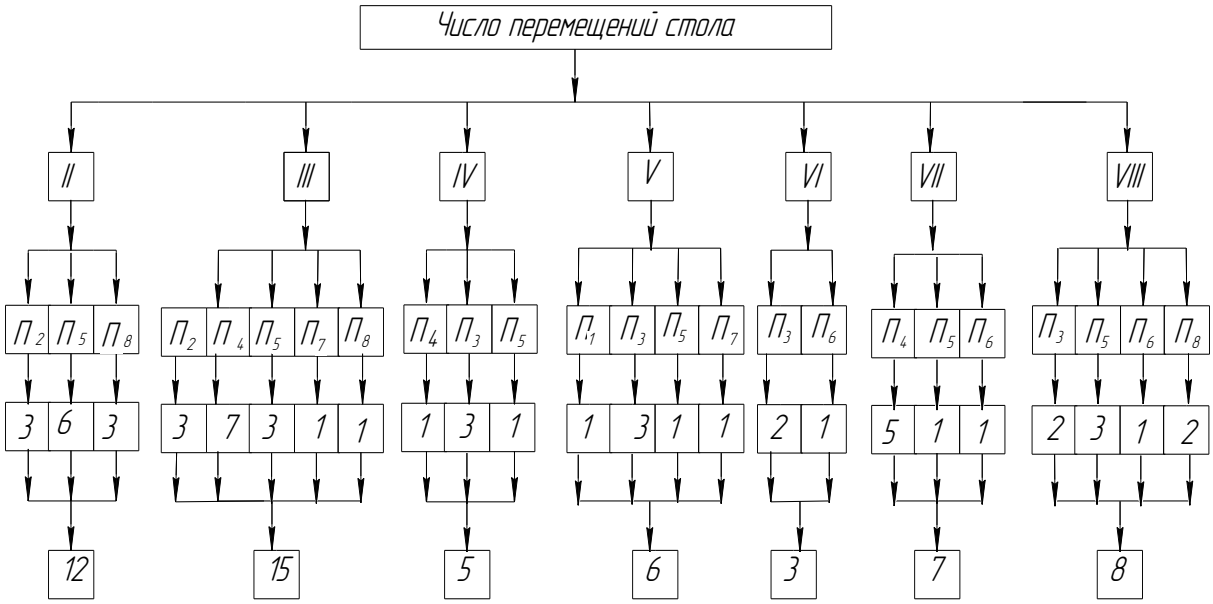
При этом программа обработки части подгрупп деталей включает не все переходы (детали подгрупп $П_1$, $П_3$, $П_4$, $П_6$, $П_7$) и в револьверной головке используются не все инструменты.

При переходе с обработки одной детали на другую производится переналадка станка: меняются соответствующие инструменты, элементы групповой оснастки, устанавливаются ограничения в программе по линейным размерам, вводятся другие режимы резания и т.п.

Одним из важнейших вопросов групповой обработки деталей на переналаживаемом оборудовании является планирование загрузки станка с учетом программы выпуска изделий и потерь времени на переналадку для обработки каждой последующей детали группы.

Например, для подгруппы $П_2$, $П_5$ и $П_8$, включающих 12 наименований эффективным методом решения задачи рационального планирования загрузки являются направленный перебор и оценка возможных вариантов оптимальной последовательности запуска. Это комбинаторная задача дискретной оптимизации при целочисленных переменных, решаемая методом ветвей и границ. При поиске оптимального решения

последовательно за несколько шагов, разбивают множество на конечное число подмножеств. На каждом шаге проверяют, содержит ли данное подмножество оптимальное решение или нет. На каждом шаге для очередного разбиения выбирается подмножество с минимальным значением оценки. Поиск решения заканчивается, если на очередном шаге значение целевой функции будет наименьшим по сравнению с оценками



для всех остальных подмножеств.

Рисунок 3. распределение деталей по числу перемещений стола по координатам и радиусам смещения шпинделя в радиальном направлении на столе станка

Сходимость процедуры к оптимальному решению, а также увеличение ее быстродействия по сравнению с полным перебором следуют из конечности множества, свойства неуменьшающейся границы оценок для цепочки вложенных подмножеств и правила ветвления.

Процесс решения задачи определения оптимального порядка запуска деталей на обработку основан на переходе всех последовательностей обработки к более мелким подмножествам и вычислении для каждого из них границы затрат на переналадки. Решение задачи носит итерационный характер.

Алгоритм решения задачи – применение метода ветвей и границ для дискретного программирования. Разработана программа, которая позволяет выполнить расчеты при числе различных групп деталей N=50. Но данный параметр может быть легко изменен.

Составленная программа работает в диалоговом режиме, состоит из четырех подпрограмм; для вычисления нижней границы множества значений; построения пониженной матрицы; вычисления понижений для нулевых элементов; построения новой матрицы, содержащей последовательность шагов.

Для решения задачи планирования загрузки станка с ЧПУ для подгрупп $П_2$, $П_5$ и $П_8$ потери времени на переналадку оборудования при переходе с обработки деталей одного наименования на другое были заданы специальной матрицей. В результате нижняя граница трудоемкости переналадок оборудования получилась равной 470 мин.

На первом этапе разбиения множеств получилось, что подмножество, содержащее последовательность перехода обработки детали, условно обозначенной четвертым номером, на деталь под номером девять, имеет значение затрат времени на переналадку, равное 345 мин. Поэтому последующее ветвление производится из этого «перспективного» элемента разбиения. На каждом шаге для очередного разбиения выбирается подмножество с минимальным временем на переналадку. На основании граф-

дерева, показывающего, какие подпоследовательности имеют минимальное значение оценки, нетрудно составить общую последовательность обработки групп деталей: 9-2-7-1-5-6-3-11-8-12-4-10. Общие затраты времени на переналадку оборудования составили, соответственно матрице,485 мин. Выбранный порядок запуска групп деталей на обработку сводит к минимуму продолжительность переходного состояния.

Задача выбора оптимального числа запусков групп изделий решается после задачи выбора оптимальной последовательности запуска. Это дает возможность точно установить величину подготовительно-заключительного времени одной переналадки при переходе с одного наименования изделия на другое.

Критерием оптимизации, используемым для выбора оптимального числа запусков партий изделий, был принят размер незавершенного производства при лимитированном подготовительно-заключительном времени. Для решения этой задачи вводится набор переменных, называемых множителями Лагранжа, и составляется функция Лагранжа. Находятся частные производные и приравниваются к нулю.

Авторами статьи составлен оптимизирующий алгоритм для нахождения оптимального числа запусков изделий в производство.

При моделировании для переналаживаемого производственного оборудования устанавливаются следующие предварительные условия: обрабатываемые изделия классифицируются по группам; последовательность запуска групп в производство определена и не меняется; для каждого вида изделий величина подготовительно-заключительного времени одной переналадки не меняется; время изготовления каждой группы складывается из подготовительно-заключительного и суммы времен изготовления всех деталей группы.

Программа может работать в диалоговом режиме. Исходными данными являются: число видов изделий, допустимое подготовительно-заключительное время и штучное время обработки каждого изделия.

После предварительной обработки данных вычисляется отношение величины допустимого подготовительно-заключительного времени к к сумме времен переналадок для всех групп изделий. Если требуется взять другое значение этого отношения, то можно ввести его в диалоговом режиме. Решение задачи определения оптимального числа запусков сводится к построению последовательности чисел, отличающихся друг от друга числом запусков каждого вида изделий. Для каждого полученного варианта подсчитывается время, требующееся на переналадку. Если оно меньше допустимого, то найденный вариант удовлетворяет поставленной в задаче цели, если нет, то переходят снова к вводу нового значения.

В таблице 2 даны исходные параметры для расчета оптимального числа запусков каждой партии деталей рассмотренных выше групп.

В результате решения задачи при помощи разработанной программы получилось, что число запусков групп деталей составит: по 3,6,11 – 30 раз, по 7 – 70 раз, по 1,5 – 10-40 раз, по 2,4,8 – 60 раз.

Предложенный метод разработки группового технологического процесса, включающий в себя задачи группирования деталей, поиска последовательности периодической загрузки станка деталями различных групп и определения числа запусков деталей каждой группы, обеспечивает полное использование сверлильного станка с ЧПУ.

Таблица 2. Исходные параметры для расчетов

Номер группы	Размер группы, шт	Станкоемкость, мин	Допустимое подготовительно-заключительное время, мин
1	5000	2,8	35
2	7000	2,4	22

3	10000	1,4	15
4	12000	1,0	15
5	7000	1,6	35
6	20000	0,9	95
7	8000	2,4	20
8	30000	1,2	45
9	15000	1,9	65
10	20000	0,5	36
11	8000	1,3	80
12	6500	0,8	10

Литература

1. Бухтеева И.В., Елхов П.Е. «Групповая гибкая технология сборки задних мостов грузовых автомобилей». Известия МГМУ «МАМИ», 2012, №14 , 2012 г. С. 7-18.
2. Бухтеева И.В., Елхов П.Е. , Аббясов В.М. Направленный выбор компоновки гибкой автоматизированной линии сборки валов КП (статья ВАК) Известия МГТУ «МАМИ», №1(15),2013, т.2-с.136-142

УДК 681.51:621.91

ПОВЫШЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ ГИДРОСИСТЕМ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ УСТРОЙСТВ

Диана Евгеньвна Шаткова,
студентка 2 курса, группы 4-МИН-3,
кафедра «Автоматизированные станочные системы и инструменты», Университет машиностроения

Научные руководители:
1). Ю.В. Максимов, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированные станочные системы и инструменты», Университет машиностроения
2). А.А. Бекаев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные станочные системы и инструменты», Университет машиностроения

Технический прогресс в машиностроении, совершенствование машин и оборудования, усложнение их конструкции обуславливает повышение требований к надежности их отдельных узлов и деталей.

Понятие надежности комплексное, оно учитывает все этапы эксплуатации изделия, в том числе подналадку, хранение, транспортирование и профилактические мероприятия. ГОСТ 27.301-95 определяет надежность как свойство изделия выполнять свои функции, сохраняя эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки.

Надежность характеризуется безотказностью, ремонтопригодностью, сохраняемостью, а также долговечностью составляющих изделие частей. Этими свойствами во многом определяется эффективность действия любой гидравлической системы, ее техническое совершенство и экономичность.

Надежная работа гидравлических устройств зависит от многочисленных факторов, находящихся в сложной зависимости и зачастую носящих случайный стохастический характер. Все многообразие этих факторов, характеризующих реальные условия эксплуатации и оказывающих влияние на надежность, можно свести к двум группам – объективной и субъективной.

К объективным факторам относят воздействие окружающей среды, механические и другие внешние воздействия (старение, износ и др.).

К субъективным факторам относят такие, которые в той или иной мере зависят от деятельности человека (выбор схемы и конструктивного решения при проектировании, выбор элементов и их материалов, выбор режимов эксплуатации, организация технического обслуживания и др.).

Решающую роль на надежность оказывают эксплуатационные факторы, так как в процессе эксплуатации и выявляется степень надежности гидросистемы.

Таким образом, вероятность нормального функционирования гидросистем в процессе эксплуатации является одним из наиболее полных количественных характеристик, оценивающих надежность, как со стороны безотказности, так и восстанавливаемости (рис. 1), а изучение и анализ этих факторов в значительной мере способствуют повышению надежности их работы.

Гидравлические силовые приводы нашли самое широкое распространение в различных областях техники, причем они выполняют зачастую столь ответственные функции, что от надежности этих приводов зависит безопасность эксплуатации машин.

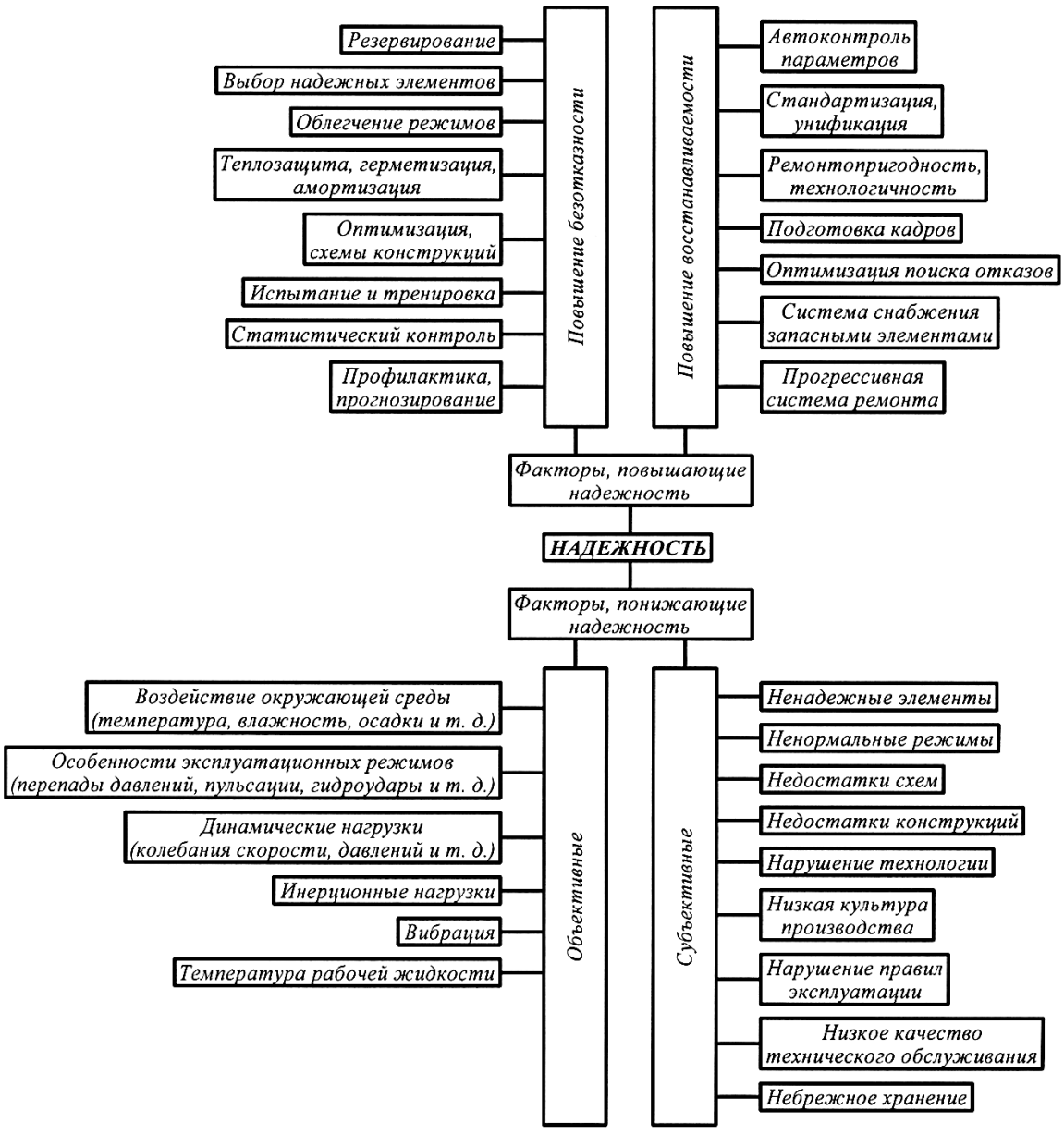


Рис. 1. Взаимосвязь факторов, влияющих на надежность гидросистем.

Так, в случае отказа гидропривода грузоподъемного устройства (пантографные подъемники, подъемные столы и платформы, гидроборты и т. д.), предназначенного для подъема и удержания полезной нагрузки (груз, люди) на требуемой высоте, может привести не только к поломке привода, но и к более тяжелым последствиям.

Все многообразие грузоподъемных устройств, классифицируют [3]:

1. *По назначению:*

• грузовые; • грузопассажирские; • пассажирские.

2. *По способу установки:*

• передвижные или автомобильные; • свободностоящие; • стационарные.

3. *По конструкции направляющих грузонесущего органа:*

• с подвесными (гибкими) направляющими; • с жесткими направляющими.

4. *По способу монтажа:*

• мобильные; • не мобильные.

5. *По конструкции:*

• мачтовые; • шахтные; • скиповые; • вышки.

Практически все грузоподъемные устройства в своей основе имеют одну и ту же принципиальную гидравлическую схему. Общий вид такой типичной гидросхемы можно представить на примере гидросистемы грузоподъемных столов (рис. 2), совместно разработанной инженерами подмосковного машиностроительного завода ОАО ООМЗ “Транспрогресс” [6] с инженерами фирмы Translyft (Норвегия).

Принцип работы гидросистемы следующий. Поток рабочей жидкости, создаваемый нерегулируемым насосом *2* поступает в рабочую полость силового гидроцилиндра *6* через обратный гидроклапан *4* и двухпозиционный гидрораспределитель *5*. В этот момент происходит преодоление нагрузки G (подъем платформы и груза *7*).

Для возврата поршня гидроцилиндра *6* в исходное положение (опускание платформы с грузом *7*) необходимо выключить насос *2* и переместить золотник гидрораспределителя *5* (с помощью подачи напряжения на электромагнит) из положения A в положение $Б$. За счет собственного веса груза G происходит выдавливание жидкости из рабочей полости гидроцилиндра *6* на слив в бак *1*.

В гидросистеме установлен обратный гидроклапан *4*, служащий для автоматической отсечки полости слива от полости нагнетания при опускании груза.

Для регулировки скорости опускания груза, в гидросистеме предусмотрен регулируемый гидродроссель или регулировочный винт – “игла” (рис. 3).

Проанализировав принцип работы гидросистемы можно выявить следующие ее достоинства и недостатки. Основными *преимуществами* являются:

• Регулирование скорости движения поршня силового гидроцилиндра (дроссельный способ регулирования при последовательном включении гидродросселя) в моменты опускания груза;

• Система разделения полости слива и полости нагнетания при обратном ходе (опускание) поршня силового гидроцилиндра;

• Простота конструкции гидросистемы и легкость в обслуживании и управлении.

Основными *недостатками* рассмотренной гидросистемы являются:

• Отсутствует возможность регулирования скорости движения поршня силового гидроцилиндра в моменты подъема груза, что может (в некоторых случаях) оказаться более важнее, чем регулирование скорости в моменты опускания груза;

• Отсутствует возможность надежно (в течение длительного времени) удерживать поршень силового гидроцилиндра в любом из положений рабочего хода, что обусловлено утечками рабочей жидкости через зазоры в гидрораспределителе;

• Отсутствует система безопасности работы гидросистемы при возникновении аварийной ситуации.

Последний недостаток является наиболее серьезным, так как аварийная ситуация может возникнуть при обрыве подводящих рукавов (это наиболее часто происходит,

вследствие их периодических изгибов и трения об элементы металлоконструкции), соединяющих силовой гидроцилиндр ***6*** и находящуюся на довольно большом расстоянии ($l \geq 1{,}5м$) гидравлическую панель управления (рис. 2). В этом случае подъемная платформа вместе с грузом (или без него) мгновенно упадет вниз.

Выявленные недостатки рассмотренной гидросистемы, имеющей типичную схему для большинства приводов подъемных устройств можно, соответственно, обнаружить и при рассмотрении гидросистем подъемных устройств западноевропейских и американских фирм, таких как Pacoma Hydraulic GmbH (Англия), Haulotte (Франция), Moog (Германия) и др.

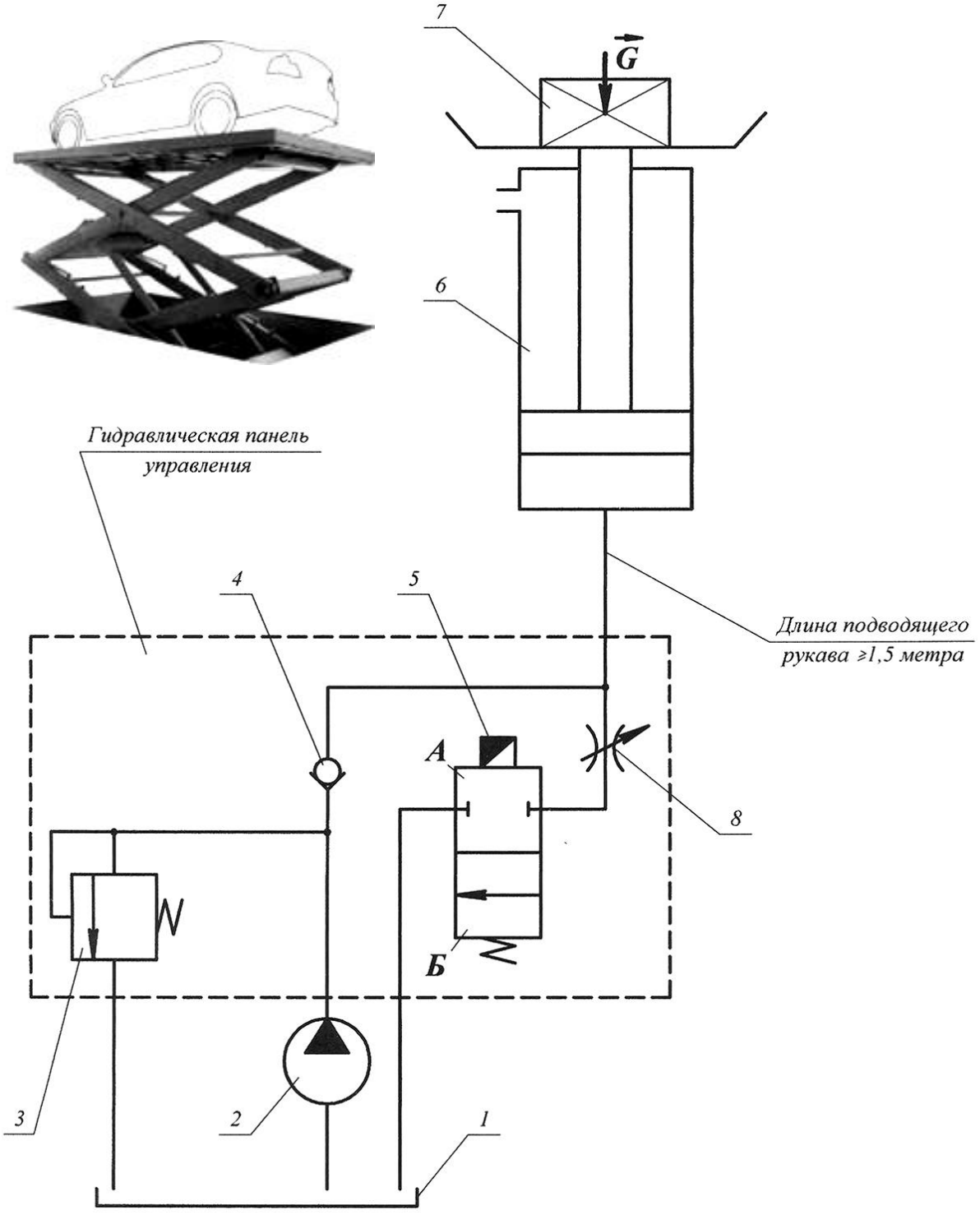


Рис. 2. Принципиальная гидравлическая схема грузоподъемных столов

(ОАО ООМЗ “Транспрогресс”):
1 – открытый бак; *2* – нерегулируемый, нереверсивный объемный (шестеренчатый) насос;
3 – предохранительный гидроклапан; *4* – обратный гидроклапан; *5* – двухлинейный двухпозиционный гидрораспределитель золотникового типа с электромагнитным управлением; *6* – силовой гидроцилиндр одностороннего действия;
7 – преодолеваемая нагрузка; *8* – регулируемый гидродроссель (игла).

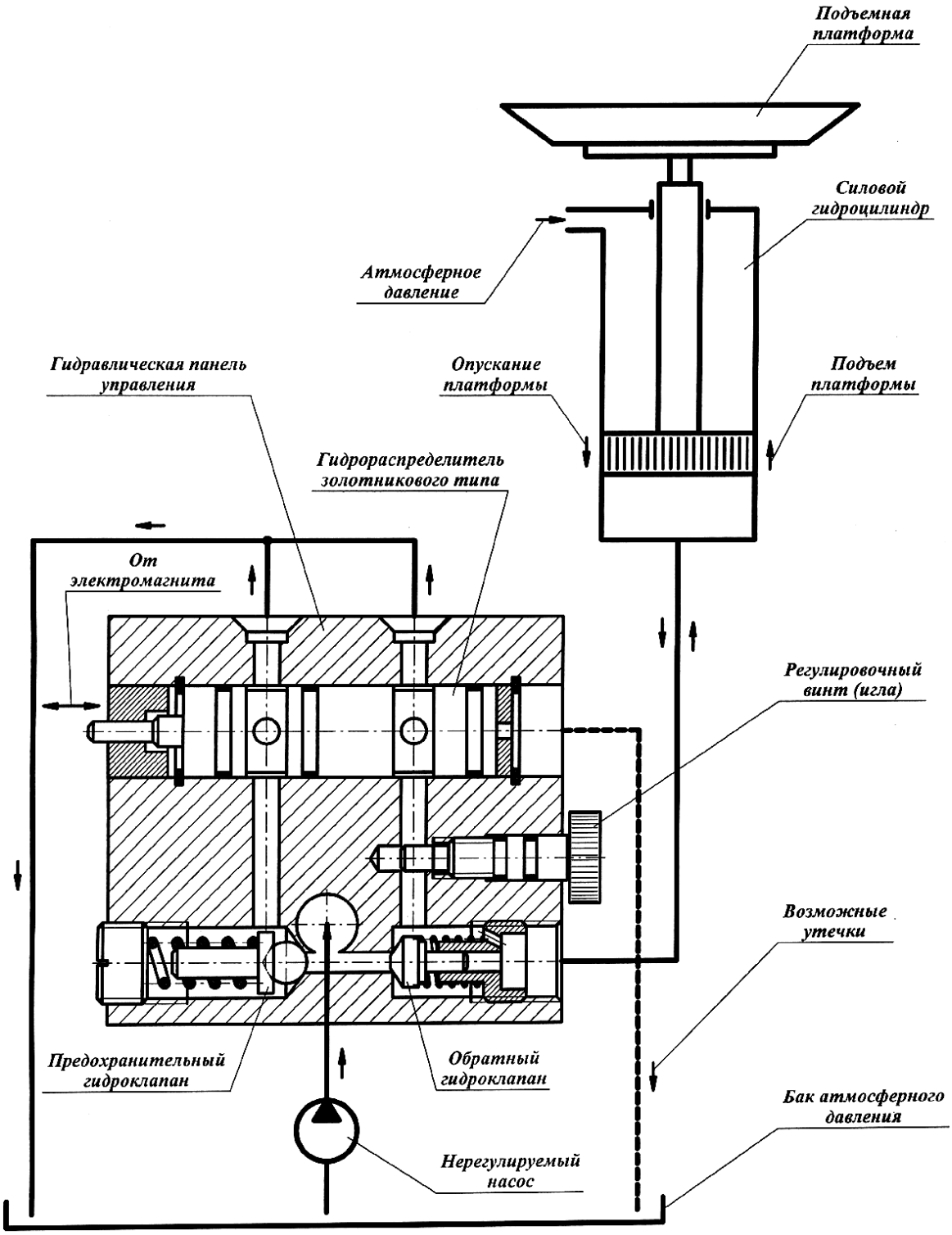


Рис. 3. Конструктивно-принципиальная схема грузоподъемных столов (ОАО ООМЗ “Транспрогресс”).

Так, например, согласно источника [5], в фирме Pacoma Hydraulic GmbH для подъемных столов и платформ была спроектирована гидросистема (рис. 4), принцип работы которой, аналогичен вышеописанной.

Обобщая вышеизложенное можно сделать вывод о том, что основной проблемой, выявленной при анализе гидросистем грузоподъемных устройств является недостаточная функциональная надежность и безопасность работы их привода.

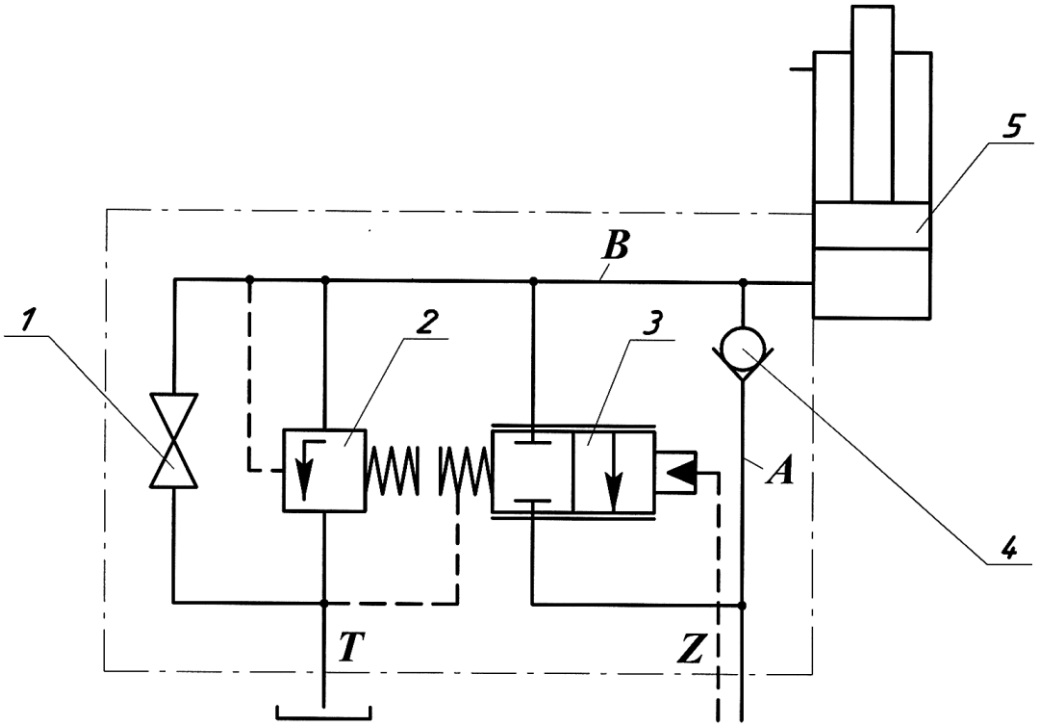


Рис. 4. Принципиальная гидравлическая схема грузоподъемных устройств (Pacoma Hydraulic GmbH):
1 – вентиль; *2* – предохранительный гидроклапан; *3* – двухлинейный двухпозиционный дросселирующий гидрораспределитель золотникового типа с гидравлическим управлением; *4* – обратный гидроклапан; *5* – подъемный гидроцилиндр.

Оценить надежность любой гидросистемы или ее агрегатов можно по двум основным количественным показателям – *вероятность безотказной работы* $p(t)$ в пределах данного отрезка времени t и *среднее временя наработки на отказ* t_m.

В теории надежности под отказом понимается событие, в результате которого происходит нарушение работоспособности механизма или прибора. Частоту отказов принято характеризовать интенсивностью отказов $\lambda(t)$, которая определяется как вероятность отказа в единицу времени. Параметр $\lambda(t)$ равен отношению числа отказавших изделий за некоторый достаточно малый промежуток времени Δt к числу работавших в начале этого периода [3, 4].

Для гидравлической системы, которая может быть отнесена к разряду сложных и восстанавливаемых систем, вероятность безотказной работы и среднего времени наработки на отказ определяется следующей формулой [3]:

$$\begin{cases} p(t) = e^{-\int_0^t \lambda dt} = e^{-\lambda_0 \cdot t} \\ t_m = \int_0^\infty e^{-\lambda \cdot t} dt = \lambda_0^{-1} \end{cases} \quad (1)$$

где λ_0 – постоянная величина интенсивности отказов, наблюдаемая в течении

основного времени работы системы (определяется опытным путем).

Так как большинство количественных показателей надежности получают в лабораторных условиях, то для приближения к реальным условиям работы в расчет вводят поправочный коэффициент интенсивности отказов k_λ [3]:

Табл. 1 – Значения поправочного коэффициента интенсивности отказов k_λ.

Лабораторные и благоустроенные помещения	1
Стационарные наземные устройства	10
Аппаратура, смонтированная в:	
• защищенных отсеках кораблей	17
• автомобилях	25
• железнодорожных вагонах	30
• самолетах	120…150

Надежность любой системы в целом зависит от надежности входящих в нее элементов, а также от способа их включения в систему. Различают два основных типа соединения элементов – *последовательное* и *параллельное*.

Под последовательным соединением элементов (рис. 5, *а*) в теории надежности понимают такое соединение, при котором отказ какого-либо элемента влечет за собой отказ всей системы. В этом случае, при условии, что отказ каждого из m элементов системы является событием независимым, вероятность безотказной работы такой системы будет определяться по следующей формуле [3]:

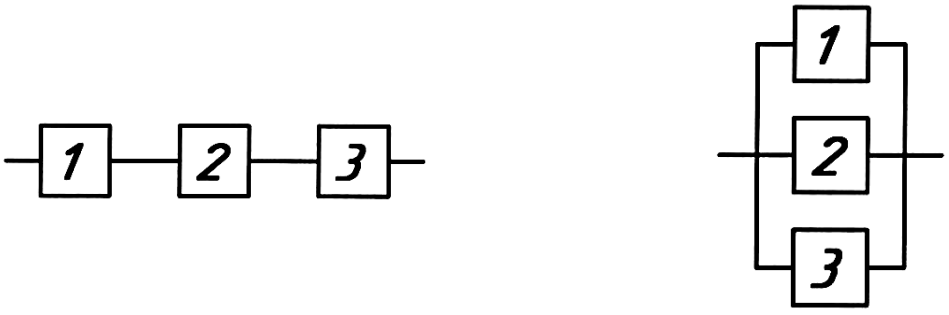
$$p(t)_{посл} = p_1(t) \cdot p_2(t) ... p_m(t) = \prod_{i=1}^{m} p_i(t) = e^{-\lambda_\Sigma \cdot t} \qquad (2)$$

где λ_Σ – интенсивность отказов всей системы, $\lambda_\Sigma = \sum_i \lambda_{0_i}$.

При параллельном соединении элементов (рис. 5, *б*) отказ всей системы возможен только при условии отказа каждой из параллельных ветвей. Вероятность безотказной работы такой системы будет определяться по формуле [3]:

$$p(t)_{парал} = 1 - \prod_{i=1}^{m} (1 - p_i(t)) \qquad (3)$$

Параллельное соединение является основой для резервирования (дублирования) систем и элементов, а само резервирование – является одним из способов повышения надежности гидросистемы.



а) ***б)***

Рис. 5. Два основных типа соединения элементов системы:
а) последовательный; ***б)*** параллельный.

Для определения работоспособности рассматриваемой гидросистемы рассчитаем процент выхода подъемных устройств (например, грузоподъемных столов) из строя в течение 500 часов непрерывной работы (при расчете принимаем среднее значение времени гарантированной работы подъемных столов, указанного в их техническом паспорте, изготавливаемых на заводе ОАО ООМЗ “Транспрогресс” [6]) из-за отказа гидропривода, принципиальная схема которого приведена на рис. 2.

Из указанного рисунка видно, что подъем платформы стола осуществляется только лишь одним приводом (без дублирования). Выход из строя любого элемента вызовет потерю нормальной работоспособности всей гидросистемы и создаст аварийную ситуацию (падение подъемной платформы стола). Следовательно, при расчете надежности будем считать, что все элементы гидросистемы соединены между собой последовательно, как это показано на рисунке 6.

В первом приближении отказы всех элементов гидросистемы независимы, а закон распределения вероятности безотказной работы привода соответствует экспоненциальному закону [3].

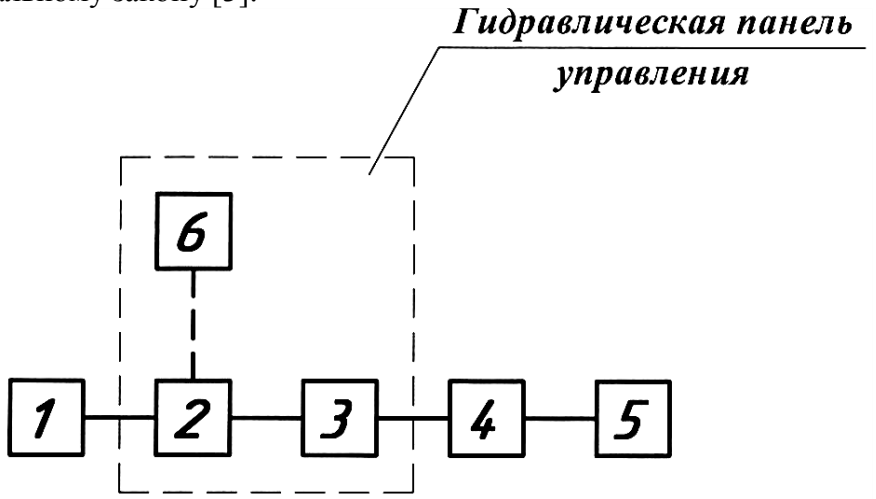


Рис. 6. Структурная модель гидросистемы грузоподъемных столов (ОАО ООМЗ "Транспрогресс"):
1 – шестеренчатый насос; *2* – обратный гидроклапан; *3* – гидрораспределитель золотникового типа; *4* – рукав высокого давления с металлической оплеткой; *5* – силовой гидроцилиндр; *6* – предохранительный гидроклапан.

В этом случае вероятность безотказной работы определим по формуле (2), при этом считая, что предохранительный гидроклапан *6* закрыт (рис. 6), т. е. давление в гидросистеме не превышает рабочее.

По таблице 13 справочника [3] находим усредненные значения интенсивности отказов каждого элемента гидросистемы, приходящиеся на 500 часов работы:

- насос шестеренчатый $\lambda_1 = 13$; • обратный гидроклапан $\lambda_2 = 4{,}6$;
- гидрораспределитель золотникового типа $\lambda_3 = 0{,}054$;
- рукав высокого давления с металлической оплеткой $\lambda_4 = 2{,}0$;
- силовой гидроцилиндр $\lambda_5 = 0{,}008$.

Тогда средняя интенсивность отказов всей гидросистемы будет равна $\lambda_{\Sigma ср.} = \sum_5 \lambda_i = 19{,}662 \cdot 10^{-6}$, приходящаяся на 1 час работы привода.

С учетом реальных условий эксплуатации принимаем поправочный коэффициент $k_\lambda = 10$ (см. табл. 1) считая, что грузоподъемные столы также используются и для обслуживания складов под открытым небом (стационарные наземные устройства), тогда в этом случае расчетная средняя интенсивность отказов столов будет равна $\lambda_\Sigma = k_\lambda \cdot \lambda_{\Sigma ср.} = 19{,}662 \cdot 10^{-5}$ на 1 час работы привода.

В этом случае вероятность безотказной работы гидросистемы в течение 500 часов составит $p(t)_{посл.} = e^{-19{,}662 10^{-5} \cdot 500} = 0{,}9064$. Следовательно, в течение 500 часов непрерывной работы без отказов в гидросистеме проработает в среднем около **90%** грузоподъемных столов (т. е. *каждый десятый стол* ***сломается***).

Как видно из расчетов функциональная надежность работы рассмотренной гидросистемы грузоподъемных столов не достаточна. Одними из основных путей по повышению надежности гидросистем являются мероприятия, проводимые как при проектировании гидросистемы, так и в процессе производства ее элементов и эксплуатации.

Выбор рациональных схем – одно из главнейших средств создания надежно работающих гидросистем.

Для решения данной проблемы некоторые фирмы-производители, такие как Linde (Германия), DinoLift (Финляндия), Palazzani Industrie (Италия), Secalt (Бельгия) и др. предлагают оснащать гидросистемы подъемных устройств управляемыми обратными гидроклапанами – гидрозамками.

Простейшая схема такого гидрозамка представлена на рис. 7. Гидрозамок состоит из обратного гидроклапана *1* и подпружиннего поршня с толкателем *2*, выполненными в едином корпусе *3*. Принцип работы гидрозамка следующий. Если давление в гидролинии X отсутствует, то при движении рабочей жидкости от гидролинии B к гидролинии A запорно-регулирующий элемент гидроклапана отжимается от седла, а поршень с толкателем перемещается вправо. При изменении направления потока в гидролиниях A и B запорно-регулирующий элемент гидроклапана прижимается к седлу и движение жидкости прекращается.

Если через гидролинию X в управляющую полость гидрозамка подать давление управления, то поршень с толкателем переместятся влево, толкатель отожмет запорно-регулирующий элемент от седла, и жидкость будет проходить через открытое окно независимо от направления ее движения.

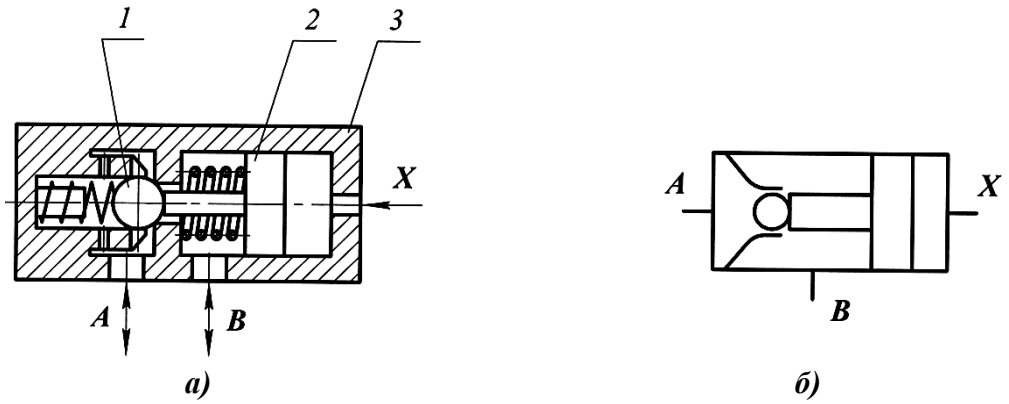


Рис.7. Односторонний гидрозамок:
а) конструктивная схема; ***б)*** условное обозначение на схемах.

С помощью гидрозамков можно обеспечить надежность и безопасность работы гидросистемы путем исключения утечек рабочей жидкости в золотниковых гидрораспределителях, а также, улучшить возможность позиционирования исполнительного органа грузоподъемного устройства.

Вместо гидрозамков, также можно использовать запорные гидроклапаны с сервоуправлением, как это делают в фирме Hesselman (Швеция), где в схеме используют электроуправляемый обратный гидроклапан [2], встроенный в гидравлическую панель управления (рис. 8).

Однако в этом случае, проблема позиционирования исполнительного органа подъемного устройства перестает существовать, но проблема надежности и безопасности его работы так и остается неразрешенной (все также может возникнуть аварийная ситуация при обрыве подводящего рукава высокого давления).

Для решения указанной проблемы, можно выделить два основных направления:

1. Создание наиболее простых схем и конструкций;

2. Создание схем и конструкций, возникновение отказов в которых имели бы ограниченные последствия (резервирование агрегатов и узлов системы).

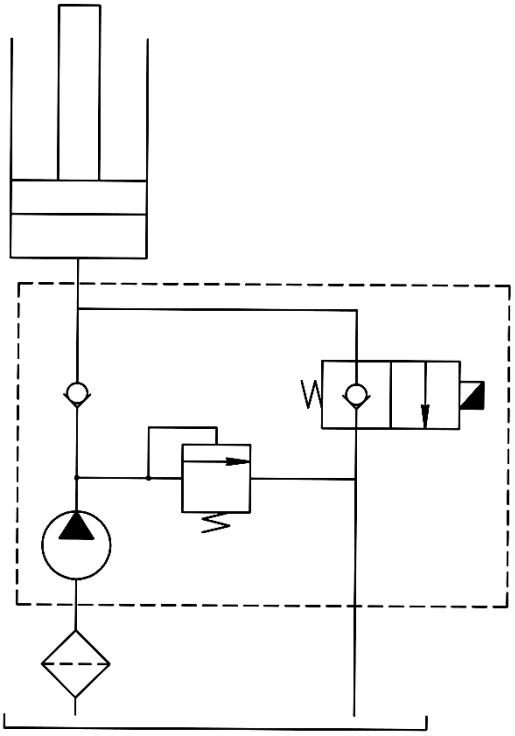


Рис. 8. Принципиальная гидравлическая схема подъемного устройства, оснащенного запорным гидроклапаном (Hesselman).

При следовании *первой рекомендации* необходимо учитывать возможность сокращения длины трубопроводов и числа их соединений, применения комбинированных агрегатов и т. д., что связано с различными конструктивными трудностями.

Выполнение *второй рекомендации* предусматривает создание таких схем, в которых при возникновении неисправностей у одного из элементов не приводили бы к неисправностям других элементов гидросистемы, что является наиболее приемлемым.

Так, например, если встроить гидрозамок не в саму гидравлическую панель управления (как это делают большинство фирм-производителей грузоподъемных устройств), а непосредственно в крышку силового гидроцилиндра (рис. 9), то проблема позиционирования рабочего органа, надежности и безопасности работы гидросистемы в целом будет решена [1]. В этом случае, модернизированная гидравлическая схема (с минимальными изменениями) примет вид, представленный на рис. 10.

Для определения работоспособности разработанной гидросистемы (рис. 10), также рассчитаем процент выхода грузоподъемных столов из строя в течение тех же 500 часов их непрерывной работы. В этом случае, вероятность безотказной работы гидросистемы будет определяться по формуле (4), учитывающей как параллельное (позиции *4* и *7*), так и последовательное (обход по позициям $1 \to 2 \to 3 \to 4+7 \to 5$) соединение элементов системы (рис. 11):

$$p(t) = p_1(t) \cdot p_2(t) \cdot p_3(t) \cdot p_{(4+7)}(t)_{парал} \cdot p_5(t) \qquad (4)$$

где $p_1(t)$ – вероятность безотказной работы шестеренчатого насоса;

$p_2(t)$ – вероятность безотказной работы обратного гидроклапана;

$p_3(t)$ – вероятность безотказной работы гидрораспределителя;

$p_{(4+7)}(t)_{парал}$ – вероятность безотказной работы параллельно соединенных элементов (рукав высокого давления и гидрозамок);

$p_5(t)$ – вероятность безотказной работы силового гидроцилиндра.

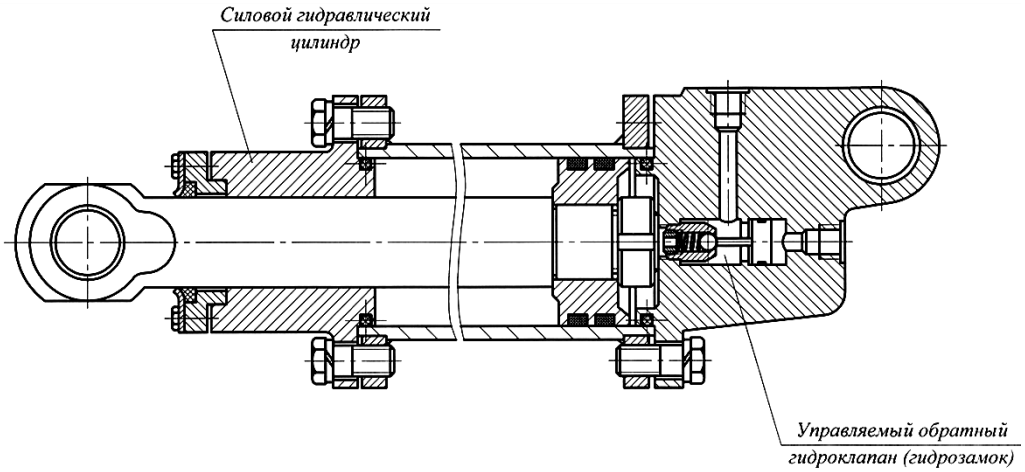


Рис. 9. Силовой гидроцилиндр, оснащенный гидрозамком.

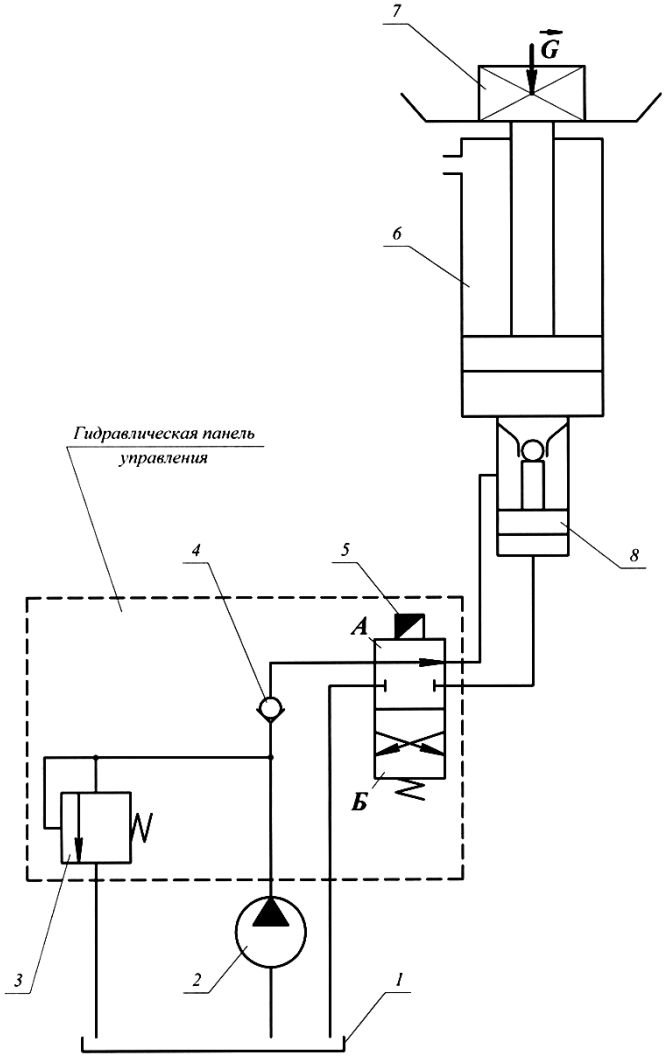


Рис. 10. Принципиальная усовершенствованная гидросхема грузоподъемных столов:
1 – открытый бак; *2* – нерегулируемый, нереверсивный объемный (шестеренчатый) насос;
3 – предохранительный гидроклапан; *4* – обратный гидроклапан; *5* – четырехлинейный двухпозиционный гидрораспределитель золотникового типа с электромагнитным управлением;
6 – силовой гидроцилиндр одностороннего действия; *7* – нагрузка; *8* – гидрозамок.

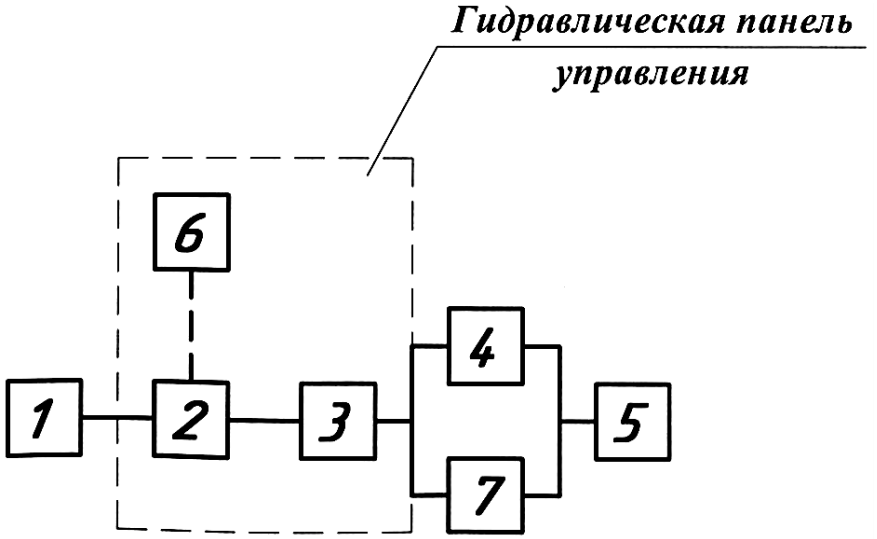


Рис. 11. Структурная модель модернизированной гидросистемы подъемных столов:
1 – шестеренчатый насос; *2* – обратный гидроклапан; *3* – гидрораспределитель золотникового типа; *4* – рукав высокого давления с металлической оплеткой; *5* – силовой гидроцилиндр; *6* – предохранительный гидроклапан; *7* – гидрозамок.

Величины $p_1(t)$, $p_2(t)$, $p_3(t)$, $p_5(t)$ определяем по формуле (2), а величину $p_{(4+7)}(t)_{парал}$ по формуле (3).

При расчете находим усредненные значения интенсивности отказов каждого элемента модернизированной гидросистемы за 500 часов непрерывной работы [3]:

- насос шестеренчатый $\lambda_1 = 13$; • обратный гидроклапан $\lambda_2 = 4{,}6$;
- гидрораспределитель золотникового типа $\lambda_3 = 0{,}054$;
- рукав высокого давления с металлической оплеткой $\lambda_4 = 2{,}0$;
- силовой гидроцилиндр $\lambda_5 = 0{,}008$; • гидрозамок $\lambda_7 = 5{,}1$.

Поправочный коэффициент интенсивности отказов, из тех же соображений, принимаем равным $k_\lambda = 10$.

Тогда, по формуле (2) имеем:

$p_1(t) = e^{-13\cdot 10^{-5}\cdot 500} = 0{,}9372$; $p_2(t) = e^{-4{,}6\cdot 10^{-5}\cdot 500} = 0{,}9773$;

$p_3(t) = e^{-0{,}054\cdot 10^{-5}\cdot 500} = 0{,}9997$; $p_5(t) = e^{-0{,}008\cdot 10^{-5}\cdot 500} = 0{,}9999$.

По формуле (3) имеем: $p_{(4+7)}(t)_{парал} = 1 - \left(1 - e^{-\lambda_4 \cdot k_\lambda \cdot t}\right) \cdot \left(1 - e^{-\lambda_7 \cdot k_\lambda \cdot t}\right) =$

$= 1 - \left(1 - e^{-2\cdot 10^{-6}\cdot 10\cdot 500}\right) \cdot \left(1 - e^{-5{,}1\cdot 10^{-6}\cdot 10\cdot 500}\right) = 1 - (1 - 0{,}99) \cdot (1 - 0{,}9748) = 0{,}9997$

В результате, вероятность безотказной работы гидросистемы со смешанным соединением элементов составит:

$$p(t) = p_1(t) \cdot p_2(t) \cdot p_3(t) \cdot p_{(4+7)}(t)_{парал} \cdot p_5(t) = 0{,}9372 \cdot 0{,}9773 \cdot 0{,}9997^2 \cdot 0{,}9999 = 0{,}9152$$

Следовательно, в течение 500 часов непрерывной работы без отказов в усовершенствованной гидросистеме проработает в среднем почти **92%** грузоподъемных столов.

Обобщая вышеизложенное можно сказать, что функциональную надежность и безопасность работы гидропривода грузоподъемных столов можно существенно увеличить, если правильно выбирать рациональную схему соединения его элементов.

Литература

1. *Бекаев А.А., Максимов Ю.В., Поздышев В.С.* Повышение надежности гидросистем грузоподъемных устройств // Строительные и дорожные машины. – 2013, №8. – с. 28-32.
2. *Каталоги фирмы «Hesselman».* Hydraulics Unlimited, 2000.
3. *Комаров А.А.* Надежность гидравлических систем. – М.: Машиностроение, 1969. – 236 с. с илл.
4. *Красковский Е.Я., Дружинин Ю.А., Филатова Е.М.* Расчет и конструирование механизмов приборов и вычислительных систем: Учебное пособие для студентов вузов. – М.: Высшая школа, 1983. – 431 с., ил.
5. *Developments at Pacoma* // Hydraulic and Air Engineering. Vol. 15. №3, p.p. 20, july/september, 1987.
6. Интернет ресурс: *www.transprogress.ru*

Секция IV

Метрология и взаимозаменяемость

Председатель: **Киселев Михаил Иванович**
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Метрология и взаимозаменяемость» (МТ-4)

Ученый секретарь: **Комшин Александр Сергеевич**
кандидат технических наук, доцент кафедры МТ-4

УДК 621.9.06

МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ ТОРЦОВЫХ ЗУБЬЕВ ПО ДВУМ РОЛИКАМ

Полина Вадимовна Горелова, Андрей Владимирович Погорелый,
студенты 4 курса,
кафедра «Технология машиностроения»,
Московский государственный машиностроительный университет "МАМИ"

Научный руководитель: В.М. Аббясов,
доцент кафедры «Технология машиностроения»

В последние годы резко возросли требования, предъявляемые к повышению точности, надежности и долговечности механизмов, приборов и систем управления при одновременной минимизации их массы и габаритов. Это, в значительной степени, определяется качеством элементов соединения и передачи движения и, в частности, торцовыми зубьями.

Непрерывный метод обработки торцовыми резцовыми головками торцовых зубьев с регулируемым пятном контакта, позволяющим получать торцовые зубья с выпуклым профилем в форме удлиненной гипоциклоиды, принципиальная схема которого приведена на рис.1 - перспективный метод обработки зубьев торцовых муфт в условиях массового и крупносерийного производства.

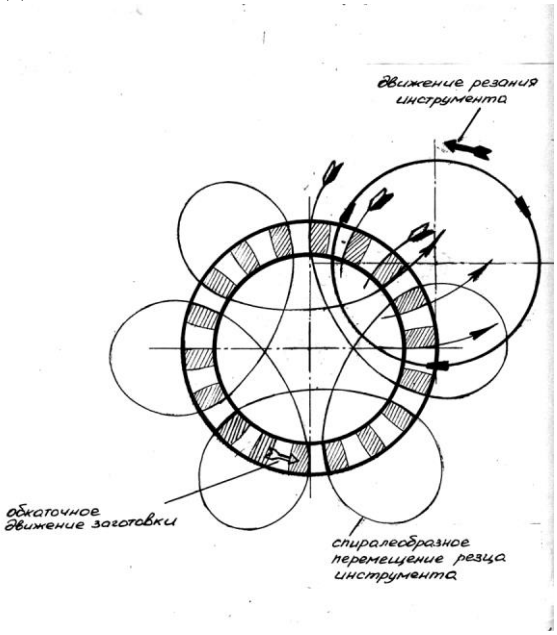


Рис. 1- Схема образования продольной кривизны гипоциклоидальных равновысоких зубьев торцовых муфт.

В качестве инструмента используется торцовая резцовая головка. Инструмент и заготовка вращаются в одном направлении с постоянными угловыми скоростями, что предполагает получение зубьев с гипоциклоидальной или плоской продольной кривизной. При обработке ось резцовой головки параллельна оси заготовки.

По сравнению с другими традиционными методами обработки, созданный метод отличается универсальностью, высокой производительностью и точностью обработки, а также позволяет улучшить качество получаемого соединения.

Для обеспечения высоких эксплуатационных показателей торцовых муфт, образованных торцовыми резцовыми головками по методу непрерывного деления, контролю должны подвергаться такие параметры полумуфт, как разность окружных

шагов, накопленная погрешность окружного шага, толщина зуба и погрешность направления зуба.

Методы, используемые при контроле параметров цилиндрических шлицевых соединений и цилиндрических зубчатых колес, могут быть применены и при контроле параметров торцовых муфт, за исключением метода контроля толщины зуба штангензубомером по постоянной хорде.

Влияние на результаты измерений погрешностей установки упора и наружного диаметра зубьев, точность обработки поверхностей которых соответствует 14-му квалитету точности, определяет низкую точность измерений методом контроля по постоянной хорде.

С целью повышения точности измерения толщины равновысоких торцовых зубьев с гипоциклоидальным профилем боковых поверхностей на окружности среднего диаметра разработан метод контроля по двум роликам (рис.2).

Проверка этим методом сводится к измерению расстояния между крайними точками цилиндрических поверхностей двух шлифованных роликов одинакового диаметра D, вложенных в две наиболее удаленные друг от друга впадины полумуфты. При контроле торцовой полумуфты с четным числом зубьев измеряется расстояние M, а с нечетным числом зубьев расстояние M′, вычисляемое как:

$$M' = M \cdot \cos\frac{90}{z_2}, \qquad (1)$$

где z_2 – число зубьев полумуфты.

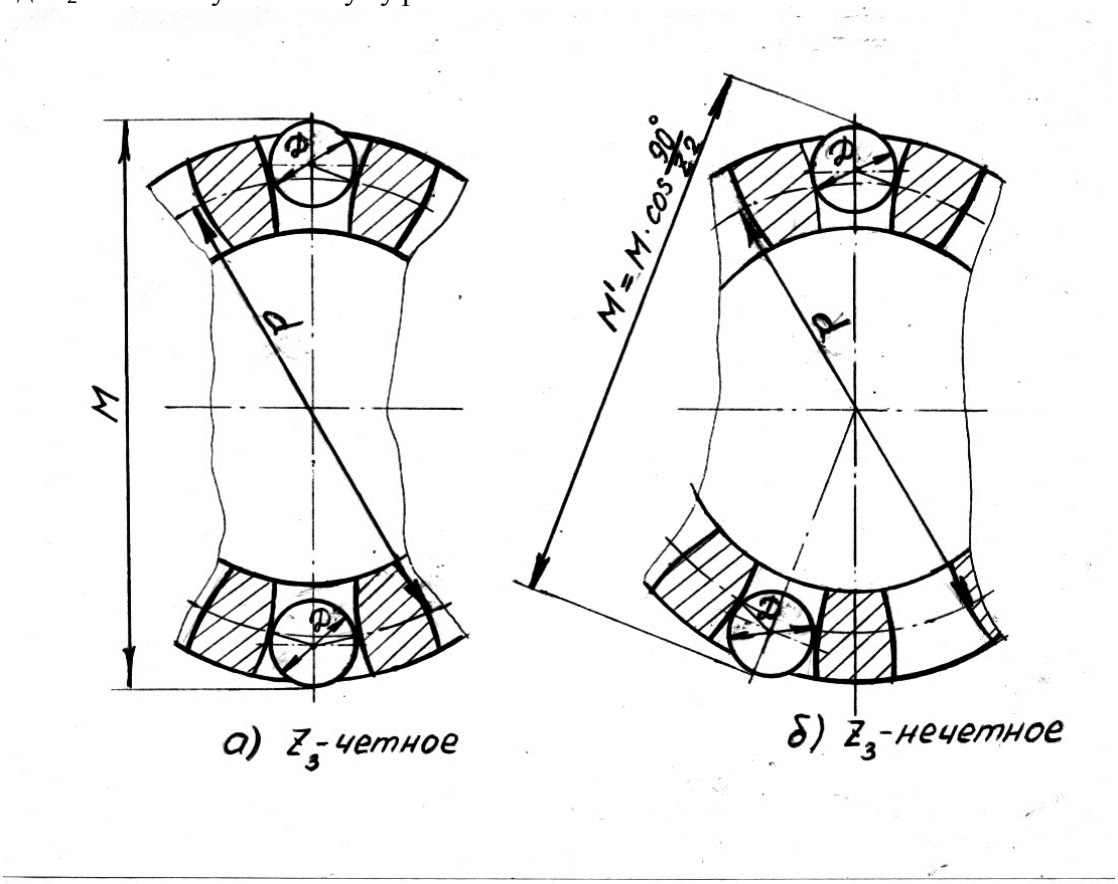


Рис. 2 - Схема контроля толщины торцовых зубьев методом двух роликов

Т.к. измеренное расстояние связано с толщиной зуба определенной зависимостью, имеется возможность на основании полученного размера определить толщину зуба.

Этот метод не требует никаких специальных измерительных средств, а размер по роликам измеряют рычажной скобой, гладким или рычажным микрометром, по аналогии с измерением толщины зуба цилиндрических зубчатых колес [2]. Кроме того, на

измерении не сказываются погрешности окружности вершин зубьев проверяемой полумуфты, т.к. эта окружность не является базой для данного метода измерения.

Ролики изготовляются с допуском 0,002мм для диаметров до 30мм и с допуском 0,003мм для диаметров свыше 30мм [1].

Недостатком данного метода, не оказывающим существенного влияния на точность измерения, является то, что результат измерения представляет собой усредненное значение толщины двух диаметрально противоположных зубьев.

Рассмотрим методику определения толщины зуба данным методом.

По известному номинальному значению толщины зубьев b на окружности среднего диаметра зубьев определяется такой размер роликов, чтобы точка касания роликов с гипоциклоидальным профилем зуба - точка Р, лежала на окружности среднего диаметра d (рис.3).

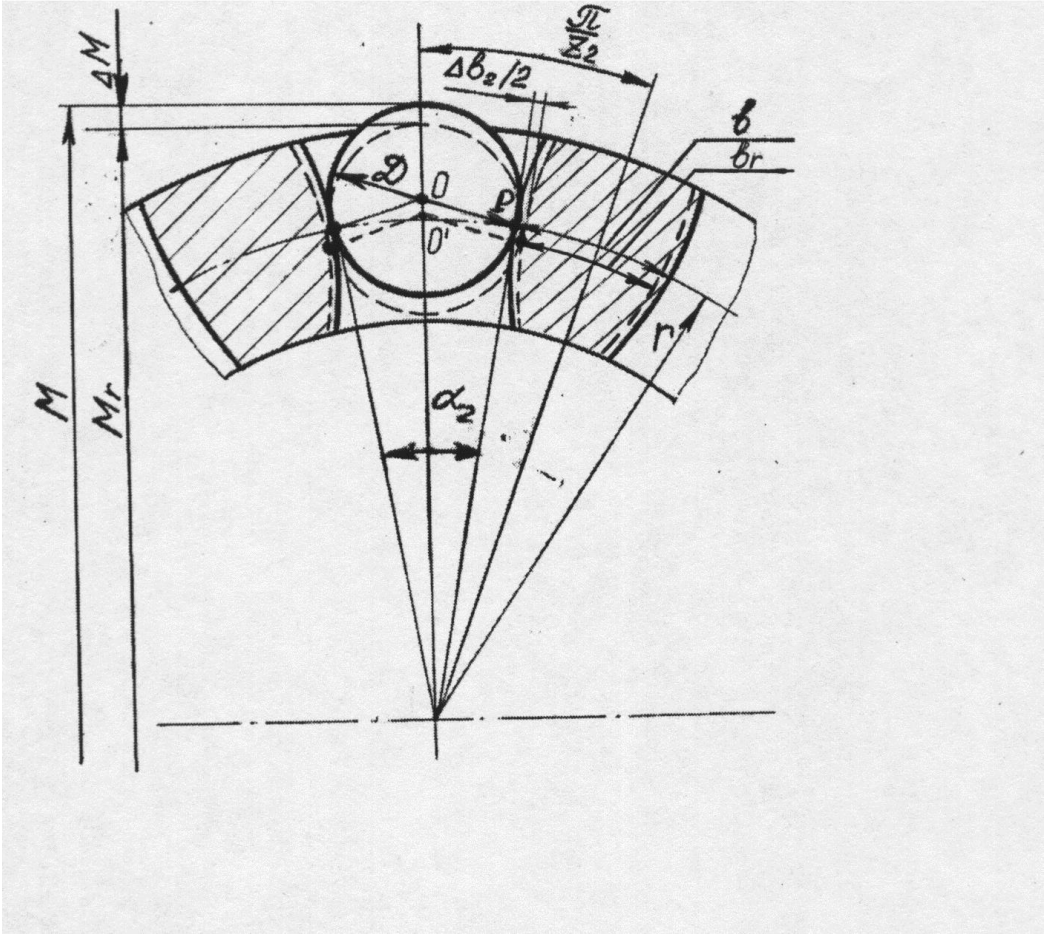


Рис. 3 - Расчетная схема для определения погрешности толщины зуба методом двух роликов

Диаметр такого ролика вычисляется по формуле:

$$D = \frac{b \cdot tg\frac{\alpha_2}{2}}{(\frac{\pi}{z_2} - \frac{\alpha_2}{2})}, \qquad (2)$$

где α2 - угол впадины полумуфты.

Расстояние между наружными поверхностями роликов должно равняться величине, рассчитываемой по формуле:

$$M = D \cdot (1 + \frac{1}{\sin\frac{\alpha_2}{2}}) \quad (3)$$

Если толщина зуба на окружности среднего диаметра отличается от номинальной b на величину Δb_2, вычисляемой:

$$\Delta b_2 = b - b_r, \quad (4)$$

то и измеренное расстояние между наружными поверхностями роликов также будет отличаться от номинального значения на величину:

$$2 \cdot \Delta M = M - M_r, \quad (5)$$

где b_r - действительная толщина зуба;

M_r - действительный размер между роликами.

Штриховые линии на рис. 2 - измененное положение профилей зубьев и роликов.

Зависимость между величинами Δb_2 и $2\Delta M$ согласно схеме рис. 2 определяется соотношением:

$$\Delta b_2 = \frac{2 \cdot \Delta M}{\cos\frac{\alpha_2}{2}} \cdot (\frac{\pi}{z_2} - \frac{\alpha_2}{2}) \quad (6)$$

Сравнивая полученные результаты при контроле одной и той же торцовой полумуфты, погрешность метода двух роликов значительно ниже, чем при измерении методом по постоянной хорде.

Так для полумуфты, имеющей параметры: внутренний диаметр полумуфты r_1 =50мм, наружный диаметр полумуфты r_2=40мм, число зубьев полумуфты z_2=15, угол впадины α_2=12°; погрешность измерения толщины зуба по постоянной хорде будет равна Δb_1=0,09мм, а при измерении толщины зуба методом двух роликов, будет составлять Δb_2 =0,002мм.

Литература

1. Тайц Б.А. Точность и контроль зубчатых колес. М., Машиностроение, 1972, 368с.
2. Тайц Б.А., Марков Н.Н. Точность и контроль зубчатых передач. Л., Машиностроение, 1978, 137с.

УДК 617.7-76

ИЗУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГЛАЗА И ГЕОМЕТРИИ ИНТРАОКУЛЯРНОЙ ЛИНЗЫ

Антон Михайлович Левандо, Виталина Юрьевна Соболева,
студенты 1 курса,
кафедра «Биомедицинская техника»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Маслова Т.И.,
ассистент кафедры РК-1.

1.Необходимость детального изучения геометрических форм хрусталика глаза.

По данным Всемирной организации здравоохранения катарактой страдает 17 миллионов человек в возрасте после 60 лет. В возрасте после 70 лет, катаракта есть в

наличии у 460 женщин и 260 мужчин на каждые 1000 человек. А после 80 лет – наличествует практически у 100% населения планеты. Кроме того, мировая статистика показывает, что катаракта стала причиной слепоты у 20 миллионов человек. Несмотря на то, что в большинстве случаев заболевание развивается у людей старше 60 лет, подвергнуться заболеванию могут люди любого возраста. Катаракта у молодых людей обычно вызывается хроническими заболеваниями, травмами глаза или приемом определенных лекарственных средств.

Катаракта - помутнение хрусталика глаза, препятствующее прохождению лучей света в глаз и приводящее к снижению остроты зрения. Заболевание может развиваться в одном или обоих глазах. В большинстве случаев катаракта возникает симметрично с двух сторон, если она не была вызвана травмой.

Чаще всего лечение катаракты хирургическое, путем имплантации интраокулярной линзы (ИОЛ). Операция требует высокой точности расчета и подбора линзы, а также безупречное качество работы врача в ходе имплантации линзы. Все вышеизложенное наталкивает на необходимость детального изучения хрусталика глаза, различных интраокулярных линз, а так же влияния геометрии линзы на комфортную зону видимости человека.

2.Хрусталик глаза.

Хрусталик (рис.1) – прозрачная, двояковыпуклая биологическая линза, обеспечивающая динамичность оптики глаза благодаря механизму аккомодации. Имеет форму двояковыпуклой линзы, передняя и задняя сферичные поверхности хрусталика имеют разный радиус кривизны. Передняя поверхность более плоская, радиус ее кривизны больше (около 10 мм), чем радиус задней поверхности (около 6 мм). Наиболее выпуклые центральные точки передней и задней поверхности называют соответственно передними и задними полюсами, а соединяющую их линию – осью хрусталика, длина которой составляет 3.5-4.5мм. Диаметр хрусталика 9-10мм. Вещество хрусталика абсолютно прозрачно и не содержит сосудов и нервов. Основная масса хрусталика состоит из волокон хрусталика, представляющих собой вытянутые в длину шестигранные эпителиальные клетки.

Периферические отделы хрусталика покрыты со стороны его передней и задней поверхностей капсулой хрусталика. Последняя представляет собой гомогенную прозрачную оболочку, более толстую на передней поверхности хрусталика, где под ней располагается эпителий хрусталика.

Вещество хрусталика имеет неодинаковую плотность: в центре оно более плотное и носит название ядра хрусталика, а по периферии менее плотное – кора хрусталика.

Хрусталик, располагаясь между стекловидным телом и радужкой, фиксируется своим периферическим закругленным краем, называемым экватором хрусталика, к ресничному телу посредством натянутых тонких волокон пояса. Они внутренним концом вплетаются в капсулу хрусталика, а наружные концы начинаются от ресничного тела. Совокупность волокон образует вокруг хрусталика связку – ресничный поясок. Разная степень натяжения ресничного пояска при сокращении и расслаблении мышцы приводит к изменению формы и оптической силы хрусталика в процессе аккомодации.

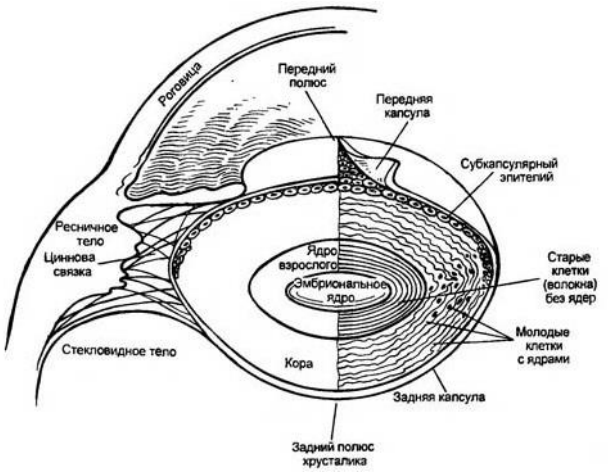


Рис.1 Строение хрусталика и расположение поддерживающей его связки.

3.Глаз как оптическая система.

Глаз человека представляет собой сложную оптическую систему (рис. 2), которая состоит из роговицы, влаги передней камеры, хрусталика и стекловидного тела. Для расчета подобных систем необходимо определение радиусов преломляющих элементов, расстояния между ними, а также показателей преломления сред.

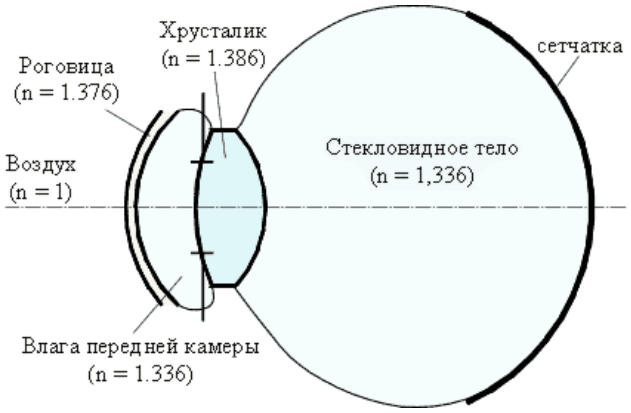


Рис.2 Оптическая система глаза.

Преломление света в глазе происходит главным образом на его внешней поверхности – роговой оболочке, или роговице, а также на поверхностях хрусталика. Радужная оболочка определяет диаметр зрачка, величина которого может изменяться непроизвольным мышечным усилием от 1 до 8 мм. Однако определение указанных констант в живом глазу вызывает большие затруднения.

Показатели преломления сред определены, главным образом, опосредованно, на основании теоретических расчетов. Радиусы передней и задней поверхностей хрусталика определяются с помощью довольно сложных методик. Наиболее распространен в настоящее время ультразвуковой метод исследования оптического аппарата глаза. Он сравнительно прост, позволяет довольно точно определить расстояние между границами оптических элементов глаза, длину глазного яблока, но не дает возможности измерить радиусы преломляющих поверхностей глаза. Поэтому приходится рассчитывать оптическую силу хрусталика по ультразвуковым данным и преломляющей поверхности роговицы, легко определяемой с помощью специального прибора – офтальмометра (оптического прибора, предназначенного для измерения размеров изображений, получаемых посредством лучей, отраженных от поверхностей роговицы и хрусталика. Из этих размеров можно вычислить величины радиусов кривизны роговицы и поверхностей хрусталика).

Оптическая система глаза чрезвычайно сложна, поэтому при расчетах хода лучей обычно пользуются упрощенным, эквивалентным истинному глазу (рис. 3) «схематическим глазом».

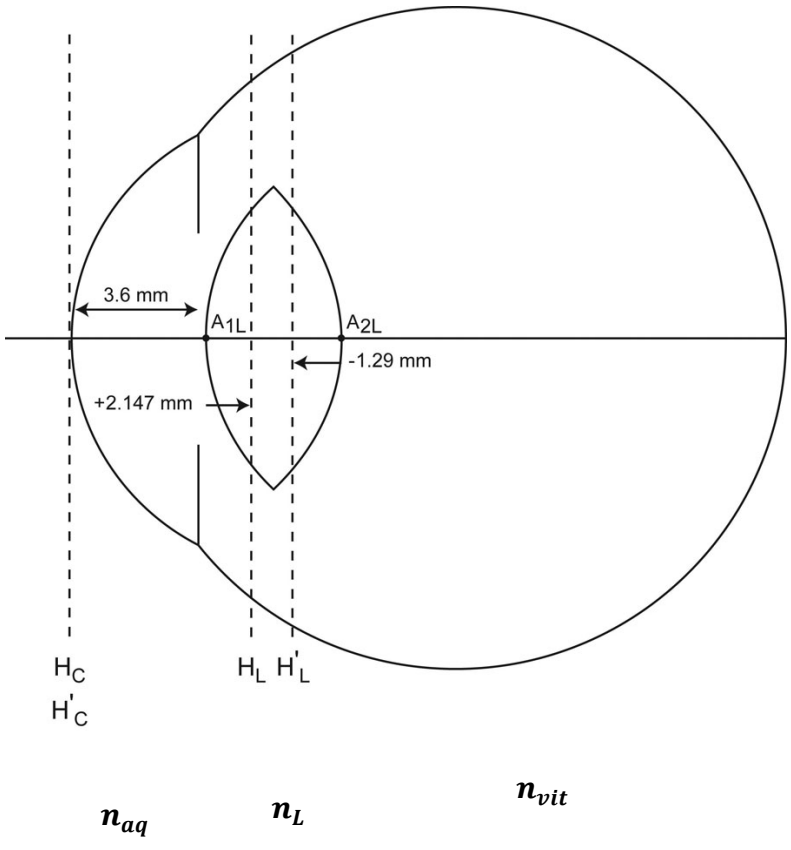


Рис.3 Схематический глаз.

Для расчета оптической силы глаза потребуется:

1. Оптическая сила роговицы глаза.

Формула оптической силы:

$$D = (n_2 - n_1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right), \quad (1)$$

где D – оптическая сила линзы, n_1, n_2– показатели преломления линзы и среды соответственно, R_1, R_2 - радиусы кривизны линзы. Для роговицы:

$$D_{cor} = \frac{n_{aq} - n_{vit}}{r_{cor}}, \quad (2)$$

2.Оптическая сила хрусталика глаза.

Формула оптической силы (рассчитываем по формуле для двух преломляющих поверхностей):

$$D = D_1 + D_2 - \frac{d}{n} \times D_1 \times D_2, \quad (3)$$

где D – суммарная оптическая сила линзы, D_1, D_2 - преломляющая сила элементов, входящих в систему, d - расстояние между элементами, n – показатель преломления среды между элементами. Для хрусталика глаза:

$$D_{Lens} = D_{1L} + D_{2L} - \frac{t}{n_L} \times D_{1L} \times D_{2L}, \quad (4)$$

где D_{Lens} – оптическая сила хрусталика глаза, D_{1L} – оптическая сила передней поверхности хрусталика, D_{2L} - оптическая сила задней поверхности хрусталика, t - расстояние между поверхностями, n_L - показатель преломления хрусталика глаза.

Для того, чтобы найти оптическую силу глаза, учитывая оптическую силу роговицы и оптическую силу хрусталика, необходимо рассчитать толщину хрусталика как

расстояние между вторичной вертикальной плоскостью симметрии H_c' и основной вертикальной плоскостью симметрии хрусталика H_L (Рис.3):

$$\overline{H_c'H_L} = \overline{H_c'A_{1L}} + \overline{A_{1L}H_L}, \quad (5)$$

где $\overline{H_c'A_{1L}}$=3.6mm, расположение главной вертикальной плоскости хрусталика связано с передней и задней поверхностью хрусталика специальным соотношением:

$$\overline{A_{1L}H_L} = n_{aq} \times \frac{t}{n_L} \times \frac{D_{2L}}{D_{Lens}} \quad (6)$$

Используя формулу (3) для расчета оптической силы двух преломляющих поверхностей, найдем оптическую силу глаза:

$$D_{eye} = D_{cor} + D_{Lens} - \frac{\overline{H_c'H_L}}{n_{aq}} \times D_{cor} \times D_{Lens} \quad (7)$$

Так, с помощью упрощенной схемы глаза, заданных показателей преломления жидкости и расстояний между элементами глаза была рассчитана оптическая сила глаза.

Для более детального изучения вопроса в программе AutoCAD были построены объемные модели схематического глаза, показывающие изменение точки фокусировки лучей в зависимости от параметров оптической системы. При здоровом хрусталике (Рис.4) лучи фокусируются на задней стенке глаза. Если человеку заменить настоящий хрусталик искусственным, то для определённого типа ИОЛ, лучи света от удалённого объекта будут также фокусировать на задней стенке (Рис.5). Однако, такие линзы не позволяют хорошо видеть вблизи. Для того, чтобы читать книгу понадобятся очки. Так же существуют ИОЛ, при имплантации которых человек сможет видеть четкое изображение вблизи, но изображение от дальних объектов будет фокусироваться за сетчаткой (Рис.6).

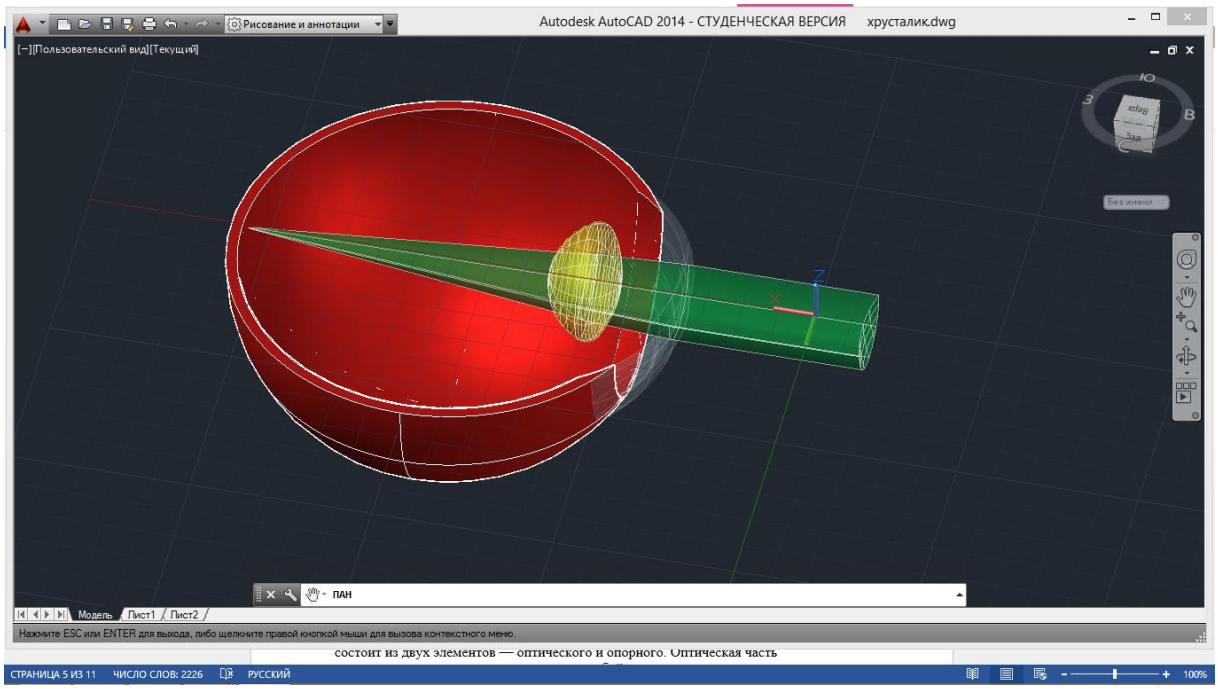


Рис.4 Оптическая система глаза с хрусталиком.

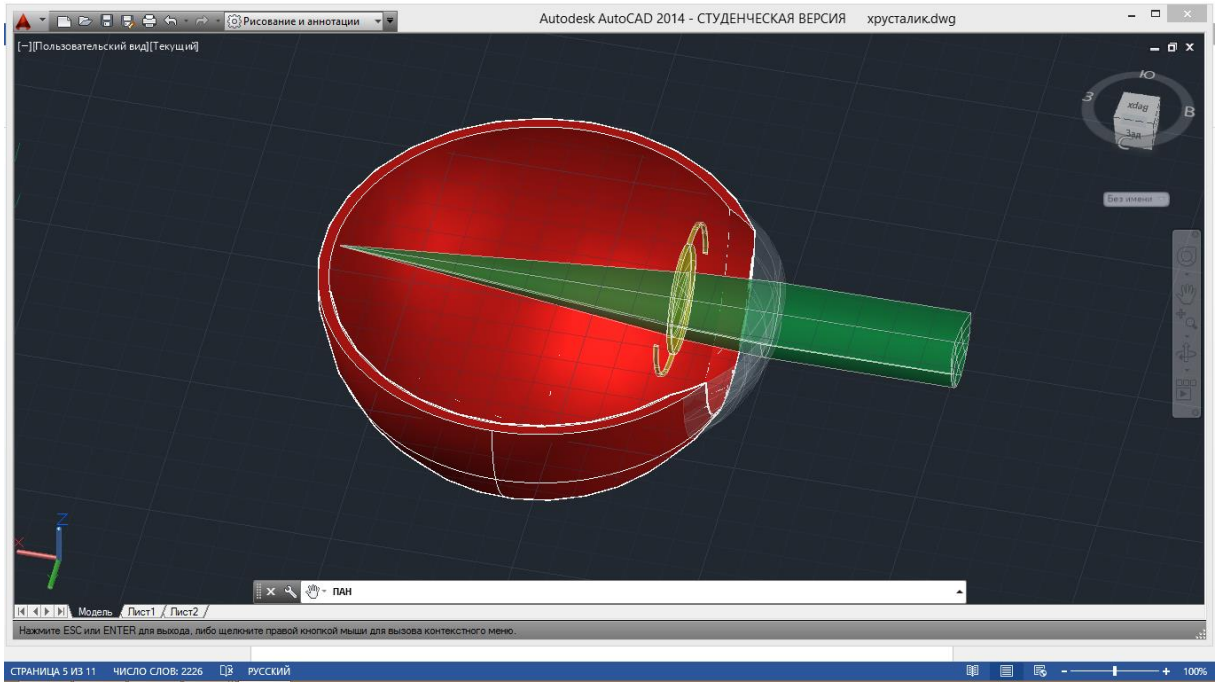


Рис.5 Оптическая система глаза с ИОЛ (тип 1) .

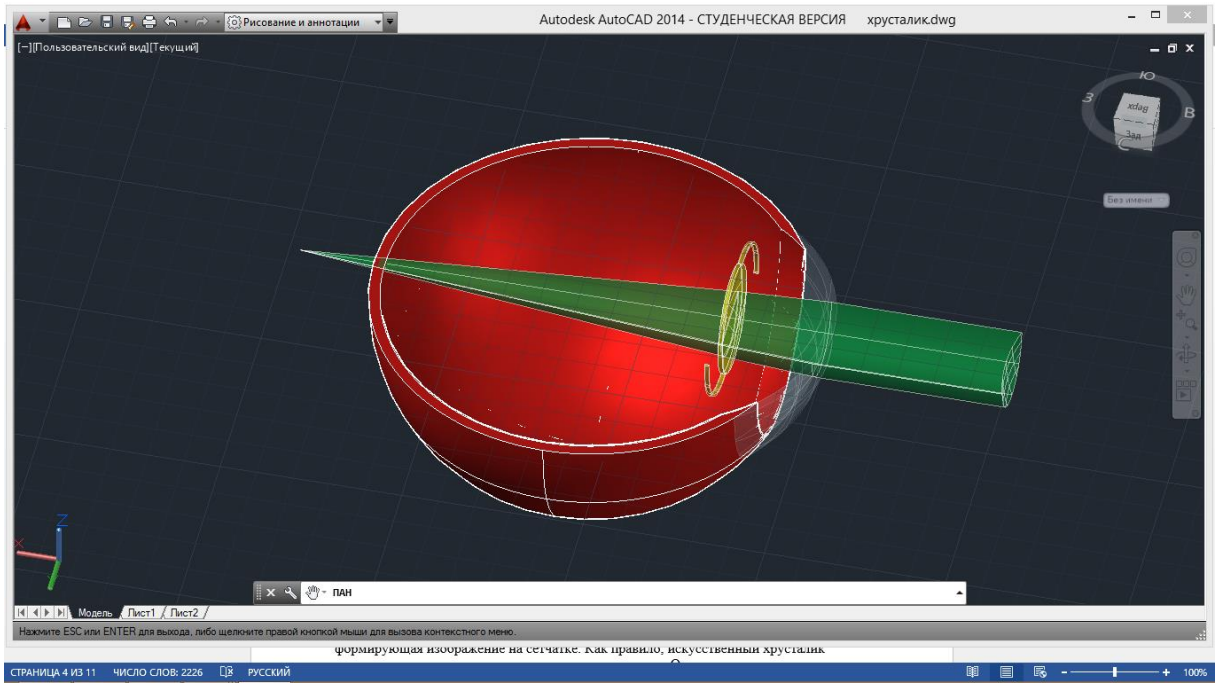


Рис.6 Оптическая система глаза с ИОЛ (тип 2).

4.Виды искусственных хрусталиков.

Искусственный хрусталик — это линза, преломляющая лучи света и формирующая изображение на сетчатке. Как правило, искусственный хрусталик состоит из двух элементов — оптического и опорного. Оптическая часть искусственного хрусталика представляет собой линзу, которая выполнена из прозрачного материала, биологически совместимого с тканями глаза. На поверхности оптической части расположена специальная дифракционная зона, дающая возможность получать четкое изображение. А опорная часть позволяет надежно зафиксировать искусственный хрусталик.

Искусственный хрусталик имплантируется на место естественного хрусталика после операции удаления собственного помутневшего хрусталика (рис.7).

Интраокулярные линзы делятся на «жесткие» и «мягкие». «Жесткие» интраокулярные линзы имеют негибкую, постоянную форму, поэтому для их имплантации требуется большой операционный разрез и последующее наложение швов, что значительно увеличивает реабилитационный период. В настоящее время более распространенными являются «мягкие» интраокулярные линзы, изготовленные из эластичных синтетических полимеров. Такие линзы имплантируются через самогерметизирующийся микроразрез около 2,5 мм и не требуют наложения швов. Они помещаются внутрь глаза в сложенном состоянии, самостоятельно разворачиваются и надежно фиксируются.

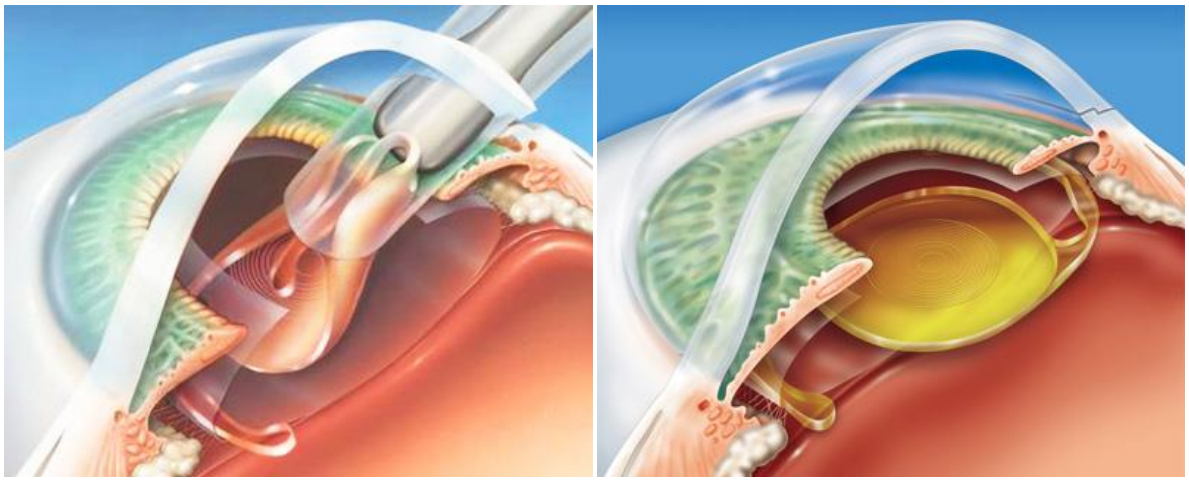


Рис.7 Замена помутневшего хрусталика на ИОЛ.

Существует 6 основных типов ИОЛ:

1) монофокальные ИОЛ (рис.8).

Наиболее распространенный тип линз на сегодняшний день. В зависимости от расчета, они дают оптимальное зрение вдаль, либо вблизи. Если такой хрусталик подобран для дали, то для чтения, комфортной работы на компьютере, пациенту потребуются плюсовые очки. Такая модель линзы имеет моноблочный дизайн, то есть опорные и оптический элементы изготовлены из одного биоактивного материала, за счет чего риск реакции структур глаза и развития вторичной катаракты сведены к минимуму. Единая конструкция интраокулярной линзы позволила не только уменьшить разрез для имплантации до 2,5 мм, но и избежать риска осложнений во время операции. При имплантации моноблочной линзы ткани глаза не травмируются, сохраняя свою форму и целостность.

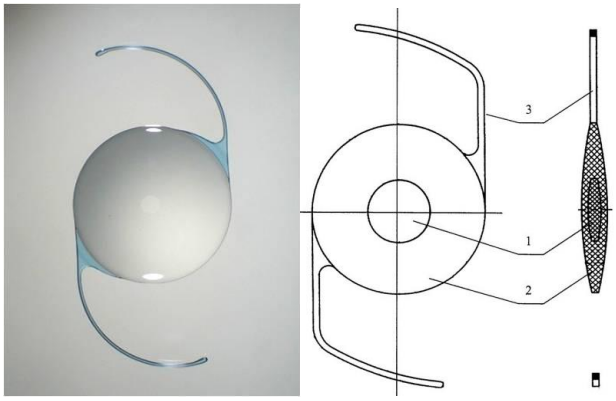


Рис.8 Изображение монофокальной ИОЛ.

2) ИОЛ с «желтым» фильтром.

Природный хрусталик человека, помимо аккомодирующих характеристик, обладает специальными защитными свойствами, предохраняющими сетчатку. С возрастом у каждого человека хрусталик желтеет. Это естественный механизм защиты сетчатки глаза от негативного воздействия ультрафиолетовых и синих лучей (для предотвращения развития дистрофий сетчатки). В процессе удаления пораженного катарактой хрусталика в ходе операции удаляется и желтый фильтр, снижаются защитные функции глаза и значительно увеличивается риск развития возрастных заболеваний сетчатки.

Желтый фильтр, которым обладает данный тип линз, аналогичен фильтру естественного хрусталика человека. Он отсекает лучи синего спектра, при этом не нарушая баланс восприятия цветов. Благодаря желтому фильтру внутриглазная интраокулярная линза защищает сетчатку так же, как и естественный хрусталик глаза.

3) Асферические ИОЛ.

Интраокулярные асферические линзы специально разработаны для коррекции сферических аберраций (искажений), часто встречающихся после имплантации искусственного хрусталика. В большинстве своем причиной их возникновения служит несоответствие оптической системы человеческого глаза или интраокулярной линзы.Наиболее распространенны сферические аберрации, возникающие из-за преломления света под разными углами при его прохождении через сферическую поверхность интраокулярной линзы и оптические среды глаза. Без соответствующей коррекции лучи света не фокусируются точно на сетчатке глаза и изображение может быть нечетким и размытым. Нередки случаи, когда после операции по удалению катаракты люди с высокими показателями зрительных функций страдают от ореолов, отблесков, засветов, которые наиболее сильно проявляются в вечернее или ночное время суток (рис.9). Поэтому были разработаны специальные модели линз с асферической поверхностью (рис.10)**.** Интраокулярные асферические линзы на всех своих участках имеют одинаковую оптическую силу, поэтому световые лучи, преломляясь через нее, фокусируются в одной, а не в нескольких точках. Такие характеристики позволяют получить более качественное изображение, что особенно важно при работе в условиях низкой освещенности, когда зрачок сильно расширен.

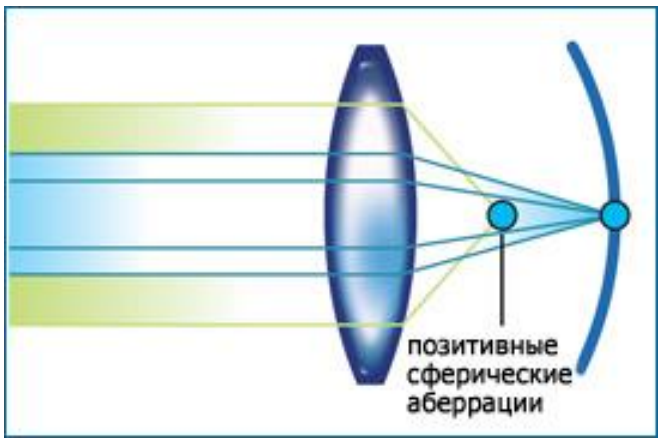


Рис.9 Сферическая оптика формирует несовершенное изображение, так как оптическая сила распределена неравномерно.

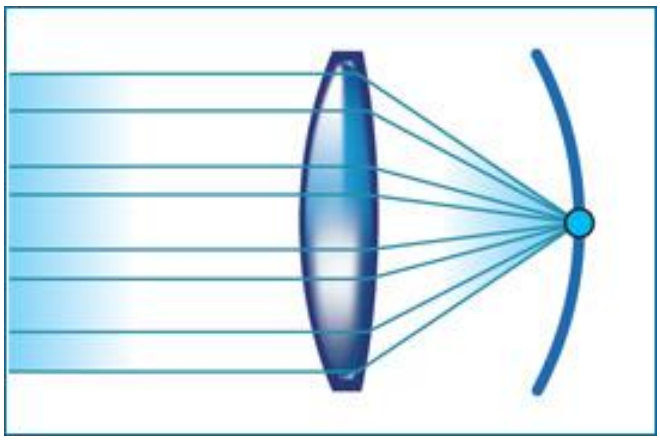


Рис.10 Асферическая линза имеет одинаковую оптическую силу на всех участках, получается более качественное изображение.

4) Торические ИОЛ (рис. 11)

Часто встречаются случаи, когда катаракта (частичное или полное помутнение хрусталика) осложнена астигматизмом. Астигматизм - недостаток оптической системы, получающийся вследствие неодинаковой кривизны оптической поверхности в разных плоскостях сечения падающего на неё светового пучка. Влияние роговичного астигматизма на зрение больше, чем хрусталикового, так как роговица обладает большей преломляющей способностью. По статистике, роговичный астигматизм встречается у пациентов значительно чаще.

Раньше катаракта, сочетающаяся с астигматизмом, создавала определенные трудности для хирурга, так как даже после удаления катаракты человек не мог хорошо видеть без специальных цилиндрических очков. Разработка и активное применение в практике врачей торических линз позволила пациентам с катарактой и астигматизмом обрести новое качество зрительной жизни. Принцип действия торических хрусталиков основан на изменении оптической силы линзы по одной из осей. Это достигается изменением формы передней поверхности хрусталика — она похожа на поверхность тора — радиус по одной оси оптики ИОЛ больше чем радиус по другой её оси (R1>R2). Таким образом, в одном искусственном хрусталике сочетаются свойства двух линз — сферической и цилиндрической. При этом задняя поверхность сохраняет асферические свойства линзы. Торическая интраокулярная линза не только замещает оптическую силу удаленного мутного хрусталика, но и исправляет исходный роговичный астигматизм.

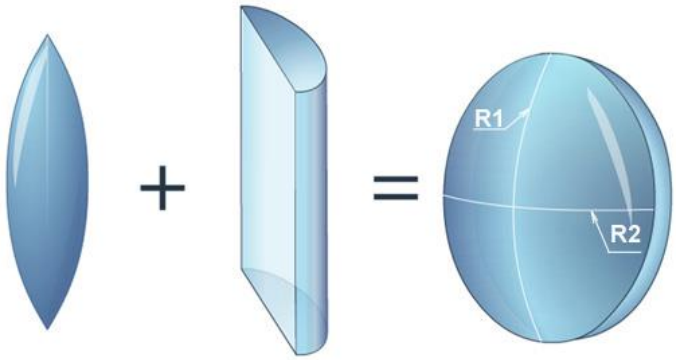


Рис.11 Торическая линза совмещает сферическую и цилиндрическую поверхность.

5) Мультифокальные ИОЛ (рис. 12).

Мультифокальные — «псевдоаккомодирующие» — линзы обладают особым преимуществом перед линзами традиционных моделей. Обладая несколькими фокусами,

мультифокальные линзы позволяют добиваться максимальной остроты зрения как вблизи, так и вдаль, а также значительно уменьшить зависимость человека от очков или вообще избавиться от них. По статистике, до 80% пациентов, которым была имплантирована мультифокальная интраокулярная линза, не пользуются очками вообще.

В зависимости от принципа действия мультифокальные линзы бывают двух различных конструкций — со смешанным дифракционно-рефракционным характером оптики и с комбинированными радиальными секторами.

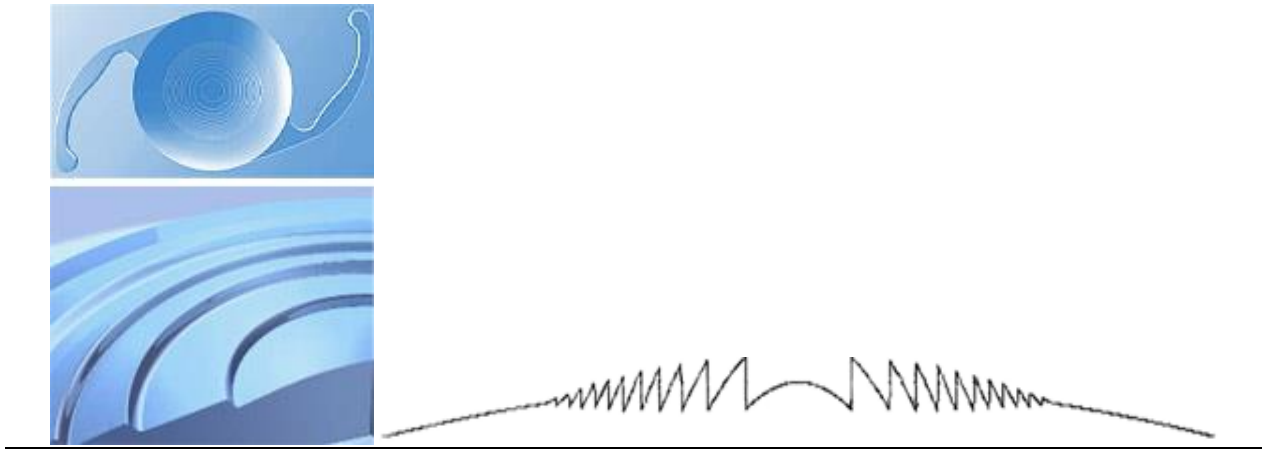


Рис.12 Такие уровни позволяют свету распадаться на более мелкие волны и формировать изображение в нескольких фокусных точках.

6) Аккомодирующие ИОЛ.

Аккомодирующие интраокулярные линзы позволяют имитировать работу естественного хрусталика глаза и добиваться оптимального зрения как вдали, так и вблизи. Такой тип линз по своим свойствам максимально приближен к естественному хрусталику человека. Благодаря своей уникальной конструкции аккомодирующие линзы, взаимодействуя с глазными мышцами, «движутся» и «изгибаются» подобно естественному хрусталику, что позволяет имитировать природную фокусирующую способность. Кроме того, стало возможно избавиться сразу от двух возрастных проблем со зрением — катаракты и пресбиопии (возрастной дальнозоркости).

6.Программа расчета оптической силы монофокального искусственного хрусталика в зависимости от комфортной зоны видимости.

В ходе изучения данной темы были рассмотрены основные этапы подготовки к операции по замене хрусталика глаза на монофокальную искусственную линзу. Одним из этапов является расчет оптической силы монофокальной ИОЛ, исходя из желаемого расстояния для оптимального зрения.

Для расчета использовались формулы (1) - (7) из пункта 3 при условии, а так же формула оптической силы: $\frac{1}{f}+\frac{1}{d}=D$, где f – длина глаза, d – расстояние для оптимального зрения, D - оптическая сила линзы. В качестве входных параметров были выбраны: показатели преломления внутренних сред глаза и искусственной линзы ($n_{aq,}n_L$), радиус кривизны роговицы глаза (r_{cor}) , длина глаза (f_{eye}). Полученное уравнение было решено с помощью метода половинного деления. В результате вычислений получена необходимая оптическая сила искусственного хрусталика. Алгоритм программы разработанный на языке программирования Pascal, представлен ниже, где naq, nair, nl – показатели преломления сред, Fcor – оптическая сила роговицы глаза, feye1 – длина глаза, rcor – радиус кривизны роговицы, hcal – расстояние от роговицы до хрусталика, a1hl – расположение основной плоскоти симметрии хрусталика, t – расстояние от роговицы до хрусталика, d- расстояние до предмета, a и b- левая и правая окрестность ответа.

```
type Fnc=function(x:real):real;
const
nair=1;
t=0.0036;
hca1=0.00366;
VAR
naq, nl, feye1, Fcor, rcor, hchl, a1hl,d,e,X:real;
function F1(x:real):real;
begin
Fcor:=(naq-nair)/rcor;
a1hl:=naq*t/nl*1/2;
hchl:=hca1+a1hl;
F1:=Fcor+x-hchl/naq*Fcor*x-1/d-nl/feye1;

end;

procedure Bisec(F:Fnc;a,b,e:real;var x:real);
var c:real;
begin
 repeat
  c:=(a+b)/2;
  if F(a)*F(c)<=0 then b:=c
  else a:=c;
 until b-a<e;
x:=(a+b)/2;
end;

begin
Bisec(F1,1,1000,e,x);
end.
```

Практическая модель.

В данной работе приводится пример расчёта оптической силы искусственного хрусталика для заданных параметров оптической системы глаза. Данные расчёты нуждаются в проверке на практике. Для этого была создана упрощённая физическая модель оптической системы глаза. В неё входят: источник света, набор линз, чёрный экран, держатель линз, подвижные платформы, пластмассовые рейки. Цель данного эксперимента в том, чтобы найти оптическую силу одной из линз исходя из параметров данной оптической системы так, чтобы лучи от источника света сошлись в точку на чёрном экране. Чёрный экран в данном случае является моделью задней стенки глаза. Конечно, данная система далека от реальных параметров оптической системы глазного яблока, но она позволяет подтвердить грамотность работы разработанного алгоритма.

Ход эксперимента: при помощи подставок для линз, черного экрана, подвижных платформ и пластмассовых реек собирается исследуемая оптическая система. Параметры данной системы вводятся в программу. Программа выводит оптическую силу линзы, необходимую для того, чтобы параллельные лучи от источник света сошлись в точку на чёрном экране

Вывод: если лучи сойдутся в пятно (рис. 13), близкое к точке, значит данный алгоритм может применяться для расчёта параметров оптической системы глаза.



Рис.13 Фокусировка лучей.

Заключение.

В ходе изучения данной темы были рассмотрены основные факторы, влияющие на выбор искусственной линзы при операции по замене хрусталика глаза. Были рассмотрены различные виды искусственных хрусталиков, с указанием их преимуществ и недостатков. Для выбора силы монофокальной линзы были разработаны: физическое решение, алгоритм и программа расчёта. Так же, для более наглядной иллюстрации были созданы объёмные модели оптической системы глаза в редакторе AutoCAD.

Литература

1. Р.Д Синельников Я.Р. Синельников Атлас анатомии человека. Учение о нервной системе и органах чувств. Т.4. – М.: Медицина, 1996. – 320 с.
2. Коган Б.М., Машилов К.В. Анатомия, физиология и патология сенсорных систем: Учеб. пособие / Б. М. Коган, К. В. Машилов. - М.: Аспект Пресс, 2011. - 384 с.
3. Optometry 5315, A Schematic Eye , Jason Porter
4. Офтальмологическая клиника «Эскимер». Катаракта. Искусственные хрусталики (Интраокулярные линзы). [Электронный ресурс]:http://www.excimerclinic.ru/cataract/intraocularlens
5. MedUniver. Гистология. Строение глаза. Структура органа зрения - глаза. [Электронный ресурс]: http://meduniver.com/Medical/gistologia/145.html
6. Патентный поиск в РФ. Способ изготовления искусственного хрусталика глаза и искусственный хрусталик глаза (патент РФ № 2239391) [Электронный ресурс]:http://www.freepatent.ru/patents/2239391
7. Г.С. Ландсберг, "Оптика", издательство "Наука", М., 1976.
8. Е.Б. Бабский, А. А. Зубков, Г.И. Косицкий, Б.И. Ходоров, "Физиология человека", издательство "Медицина", М., 1966
9. Иванова Г.С. Основы программирования: Учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002. – 416с.
10. Омура Д. AutoCAD 3D: трехмерное моделирование : пер. с англ. / Омура Д. ; пер. Орлов С. - М. : Лори, 1997.

Секция V

Литейные технологии

Председатель: **Семенов Вячеслав Иванович**
Кандидат технических наук, доцент кафедры МТ-5

Ученый секретарь: **Халикова Камила Касимовна**
ассистент кафедры МТ-5

УДК 621.74.043.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЖЕСТКОСТИ ПОДВИЖНОЙ ПЛИТЫ МАШИНЫ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Вера Сергеевна Ильющенкова,
студентка 6 курса,
кафедра «Литейные технологии»,
Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.А. Мандрик,
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейные технологии»

В последнее время произошла революция в мире машин литья под давлением и термопластавтоматов – машины литья под давлением с двумя плитами и гидрозапиранием. Все ведущие фирмы по производству машин выпустили революционные серии с таким механизмом запирания, например, Idra Revolution, Buhler Carat, DualCast и другие. Чтобы идти в ногу со временем, было предложено спроектировать двухплитную машину литья под давлением с усилием запирания 250 тонн.

Принцип машин данного типа прост – подвижная плита приводится в движение гидроцилиндрами быстрого хода (обычно двумя), происходит смыкание пресс-формы, запирание обеспечивают четыре короткоходных гидроцилиндра, по одному на каждой колонне.

Данный тип машин имеет ряд преимуществ и недостатков. Основными преимуществами являются снижение габаритов и металлоемкости машин, что является немаловажным фактором современной экономики. Но в ходе проектирования был выявлен ряд проблемных моментов, требующих дополнительного исследования.

Ряд инженеров, ознакомленных с данной разработкой, считали ее неработоспособной. Они полагали, что при рассматриваемом режиме работы и конструкции машины, во время запирания машины литья под давлением будет происходить передача усилия через колонны машины, что приведет к их разрыву.

Чтобы рассеять сомнения в работоспособности проектируемой машины, было проведено компьютерное моделирование запирания машины литья под давлением с усилием запирания 250 тонн. Кроме того, была поставлена задача анализа различных типов подвижных плит и определение их жесткости и работоспособности.

Для расчета напряженного состояния системы был выбран модуль APM Studio программы APM WIN Machine 9.7. APM WinMachine – CAD/CAE система автоматизированного расчета и проектирования механического оборудования и конструкций в области машиностроения. Эта система в полном объеме учитывает требования государственных стандартов и правил, относящихся как к оформлению конструкторской документации, так и к расчетным алгоритмам. Модуль APM Studio предназначен для создания поверхностных и твердотельных объектов в трехмерном пространстве и подготовки построенных моделей к прочностному и динамическому анализу, а также для выполнения расчетов и визуализации результатов этих расчетов.

В ходе эксперимента была построена 3D модель механизма запирания (рис.1). Для удобства анализа модель представляет половину спроектированной машины.

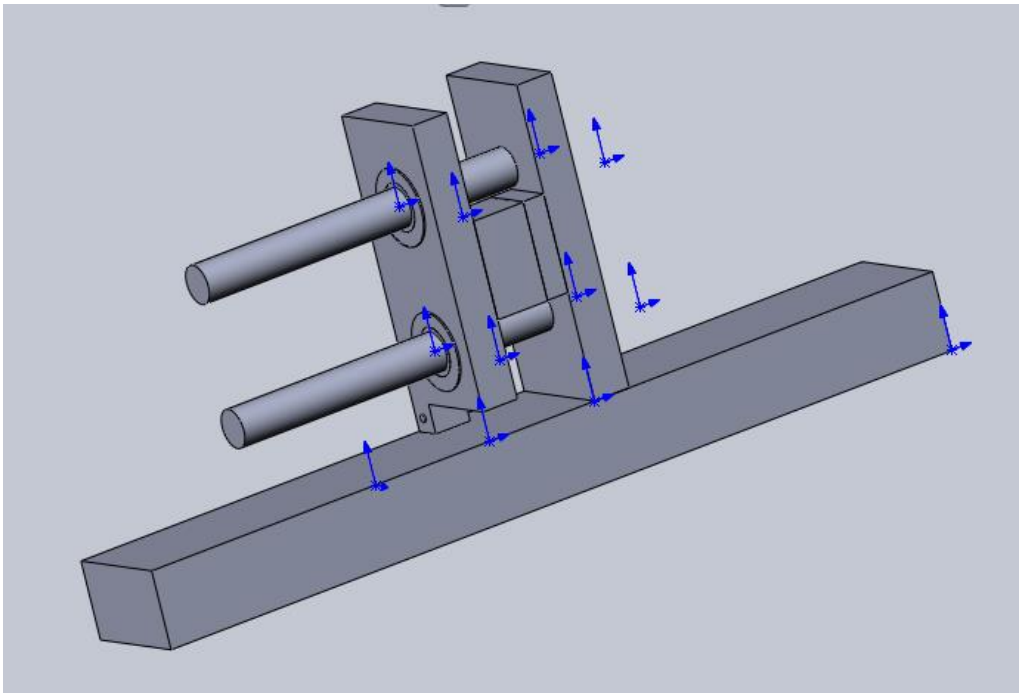


Рис.1. 3D модель механизма запирания

Было рассмотрено 4 модели, различающиеся геометрией подвижной плиты машины (рис.2 – рис.5).

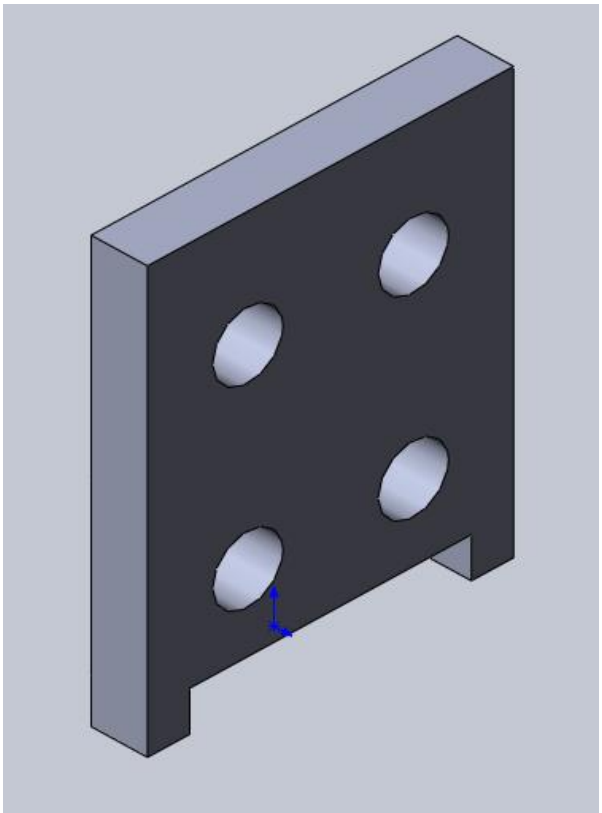


Рис.2. Плита подвижная сплошная, масса 2,8 т.

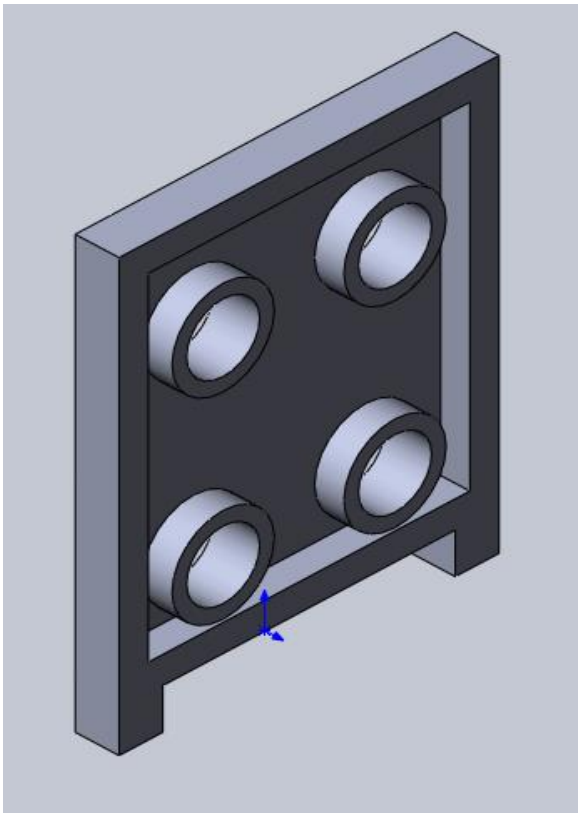


Рис.3. Плита подвижная полая с приливами под колонны (разрез), масса 2,0 т.

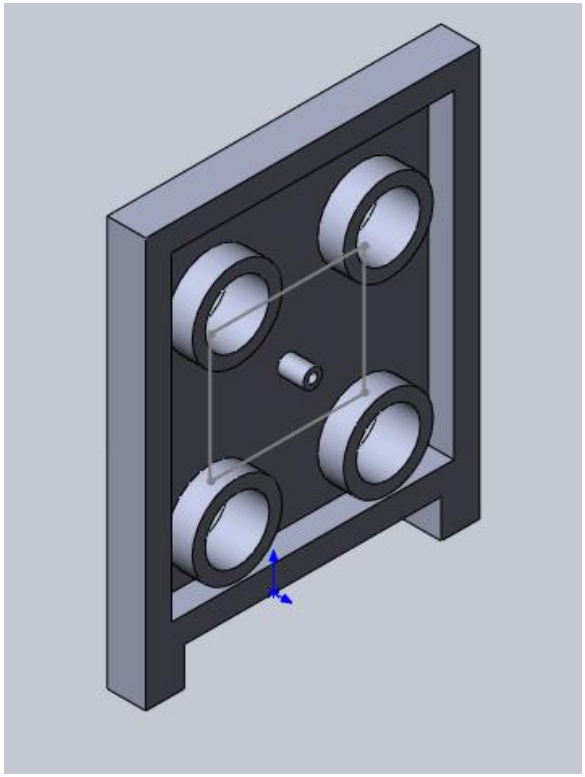


Рис.4. Плита подвижная полая с приливами под колонны и механизм выталкивания (разрез), масса 2,0 т.

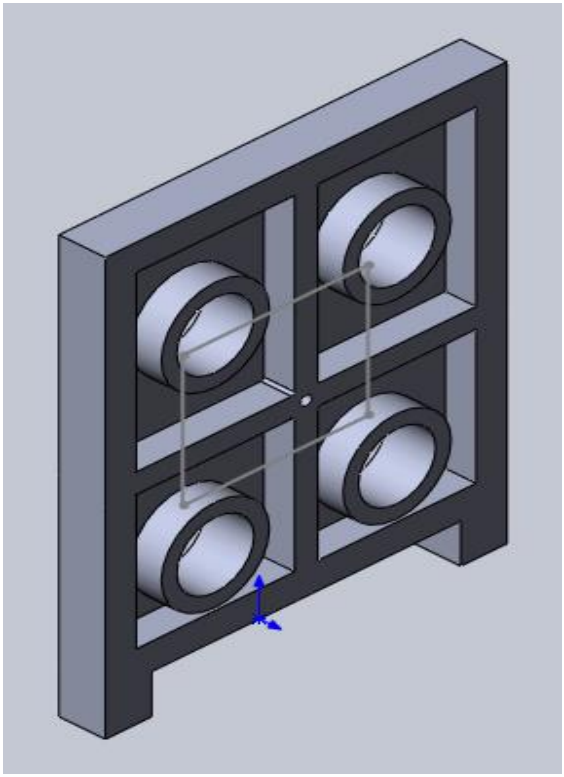


Рис.5. Плита подвижная полая с приливами под колонны и механизм выталкивания с ребрами жесткости (разрез), масса 2,2 т.

При проведении эксперимента было доказано, что напряжения в точках линейно зависит от заданного усилия запирания. Наибольшие напряжения наблюдаются в схеме 3, что можно объяснить малой жесткостью всей плиты (как и в варианте 2), кроме небольшого прилива в центре, который играет роль концентратора напряжений в центральной точке. Наименьшие напряжения наблюдаются в вариантах 2 и 4. В варианте 2 ввиду малой жесткости плиты в центре большие напряжения наблюдаются стенке плиты, прилегающей к пресс-форме, а свободной стенке они практически не передаются. В варианте 4 напряжения невысоки в связи с большой жесткостью плиты, напряжения частично гасятся на ребрах жесткости (в отличие, например, от варианта 1).

Прогиб линейно зависит от усилия запирания, что подтверждает правильность заложенных в программу алгоритмов. Наименьшие прогибы плиты наблюдаются в вариантах 1 и 4, что объясняется достаточной жесткостью плит. Наибольшие прогибы наблюдаются в наименее жесткой плите – вариант 2. Однако следует отметить, что все прогибы лежат в пределах допустимых с большим запасом.

Далее был проведен анализ напряжений и перемещений всей конструкции машины при усилии запирания 2500 кН.

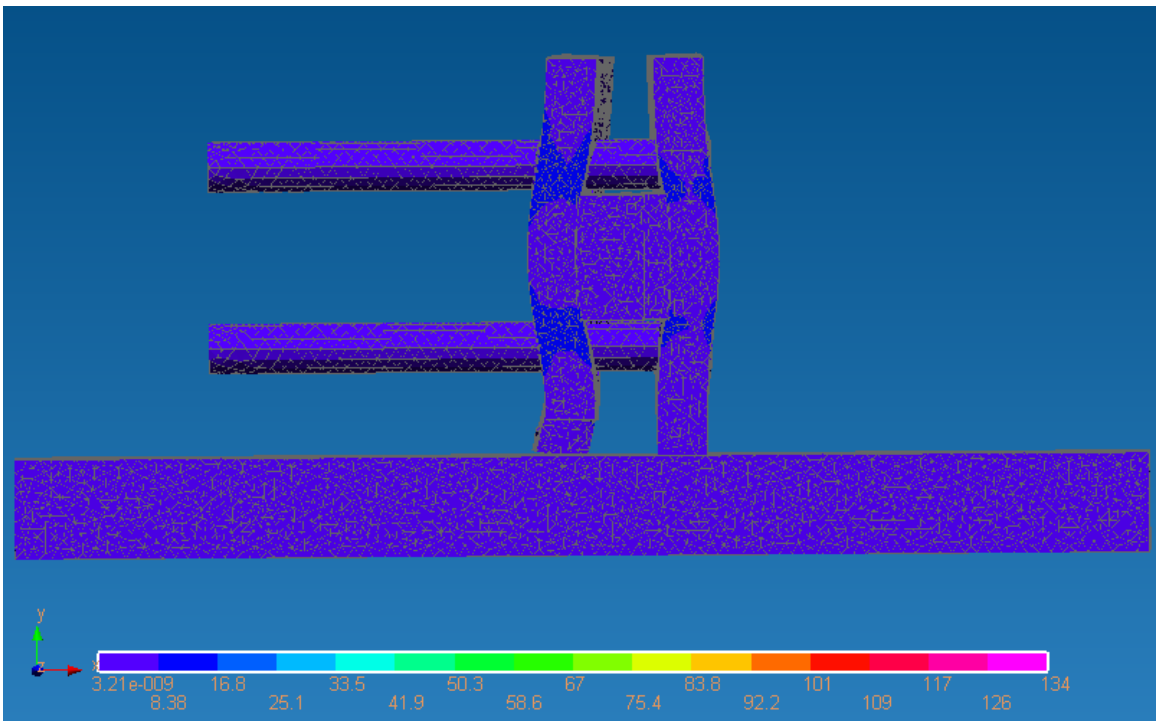


Рис.6. Напряжения в машине, сплошная плита

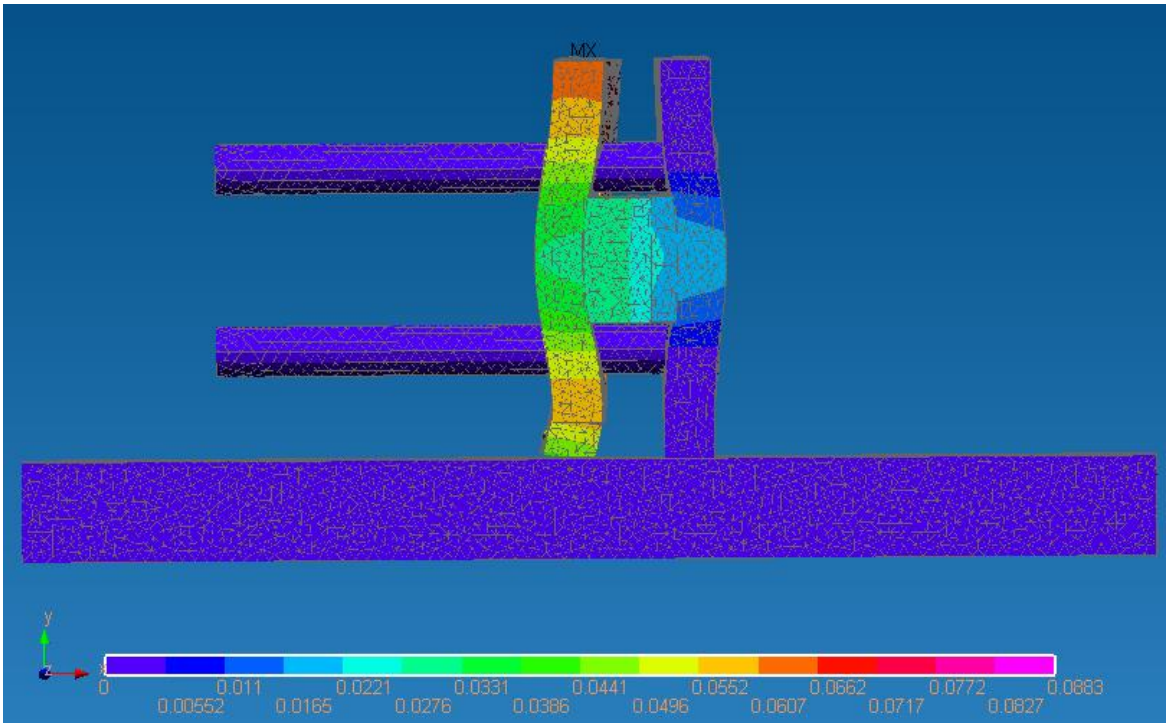


Рис.7.Перемещение точек машины, сплошная плита

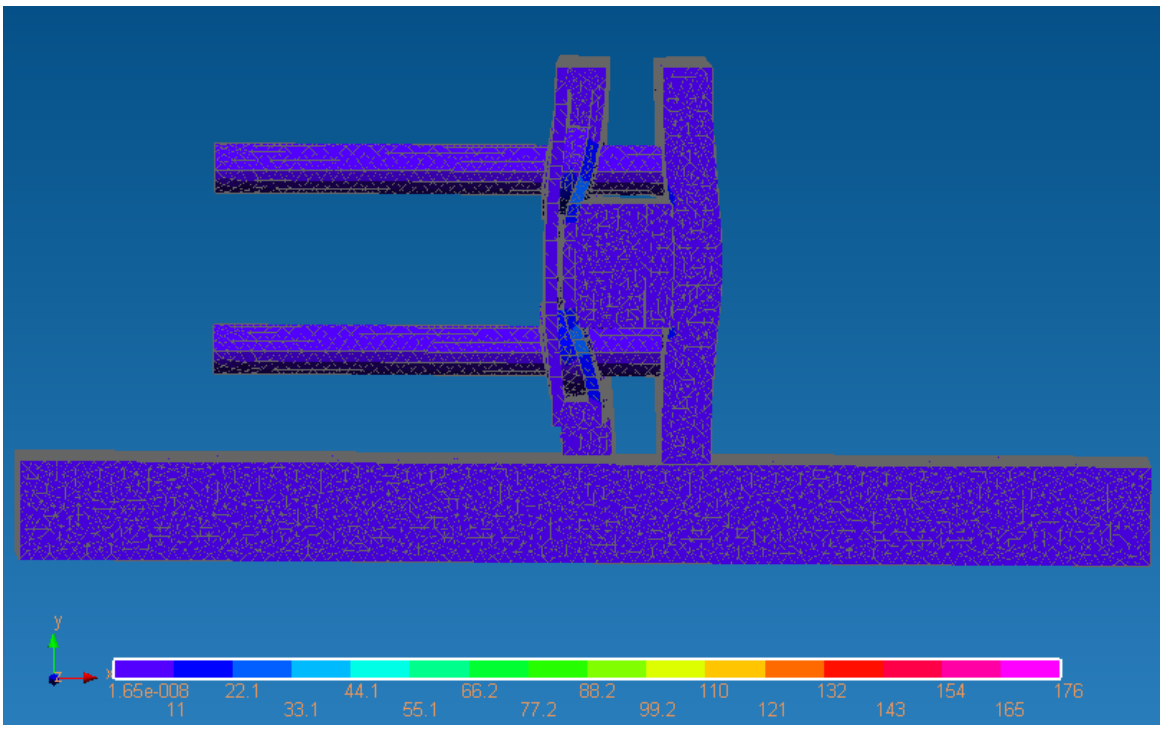


Рис.8. Напряжения в машине, полая плита с приливами под колонны

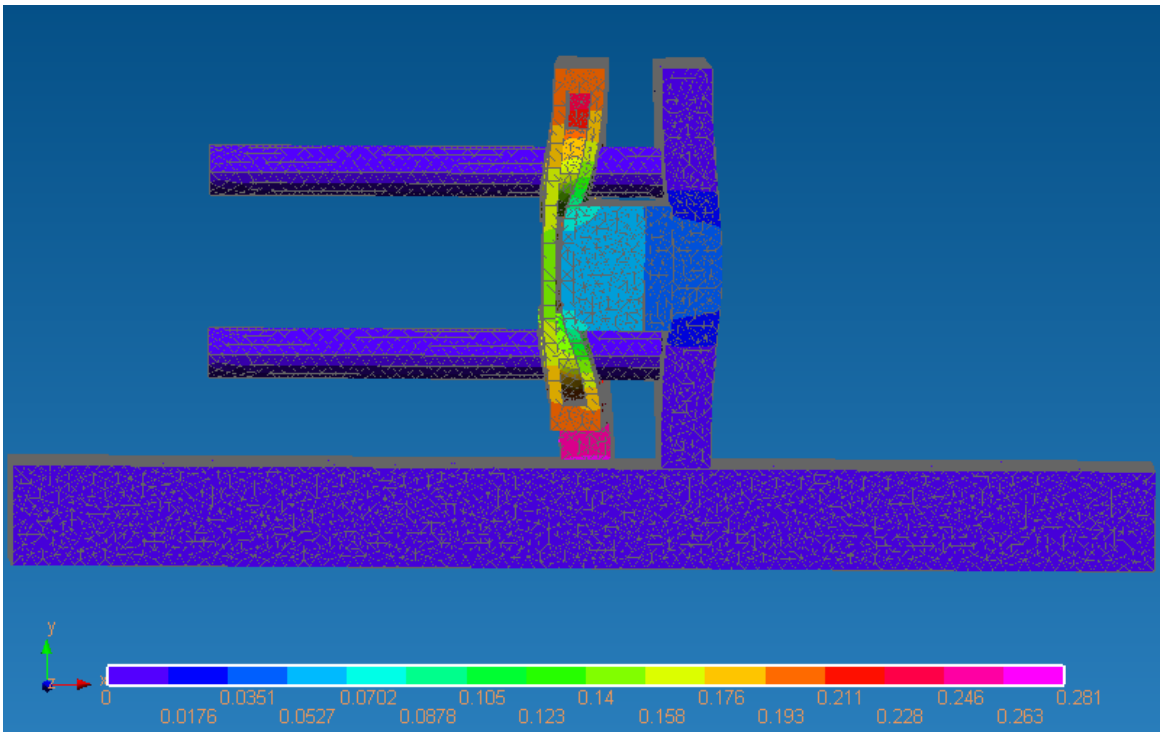


Рис.9. Перемещения элементов машины, полая плита с приливами под колонны

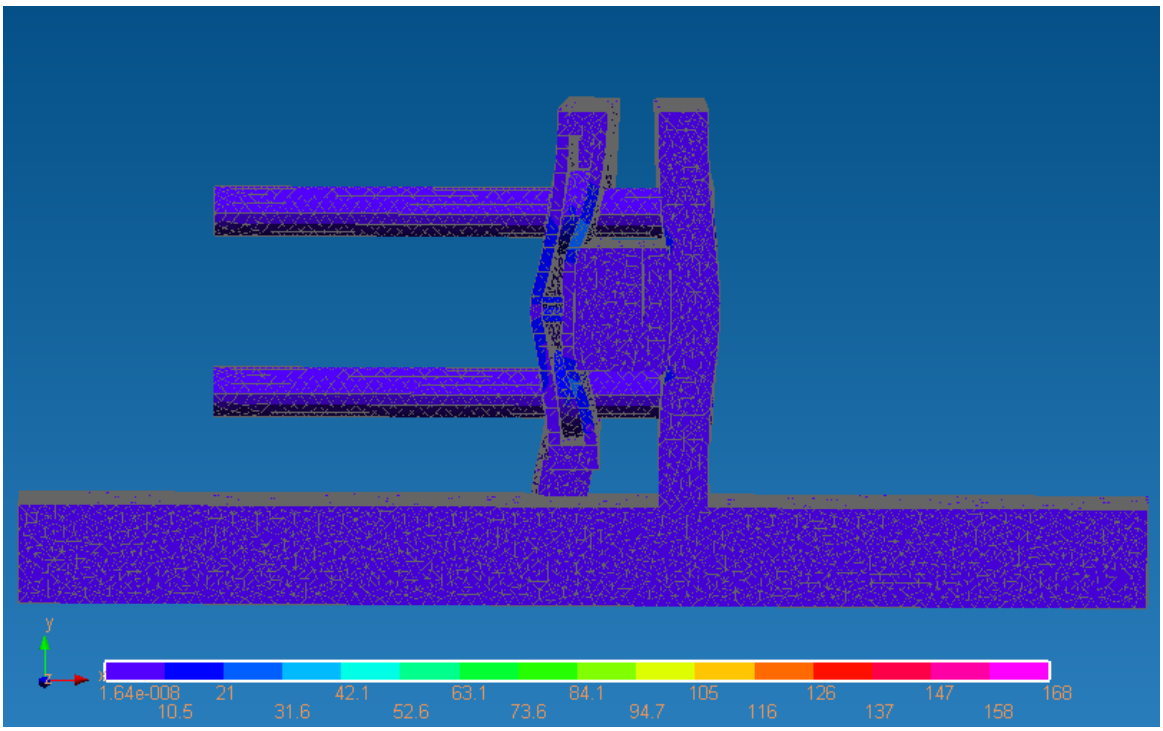


Рис.10. Напряжения в машине, плита полая с приливами под колонны и механизм выталкивания

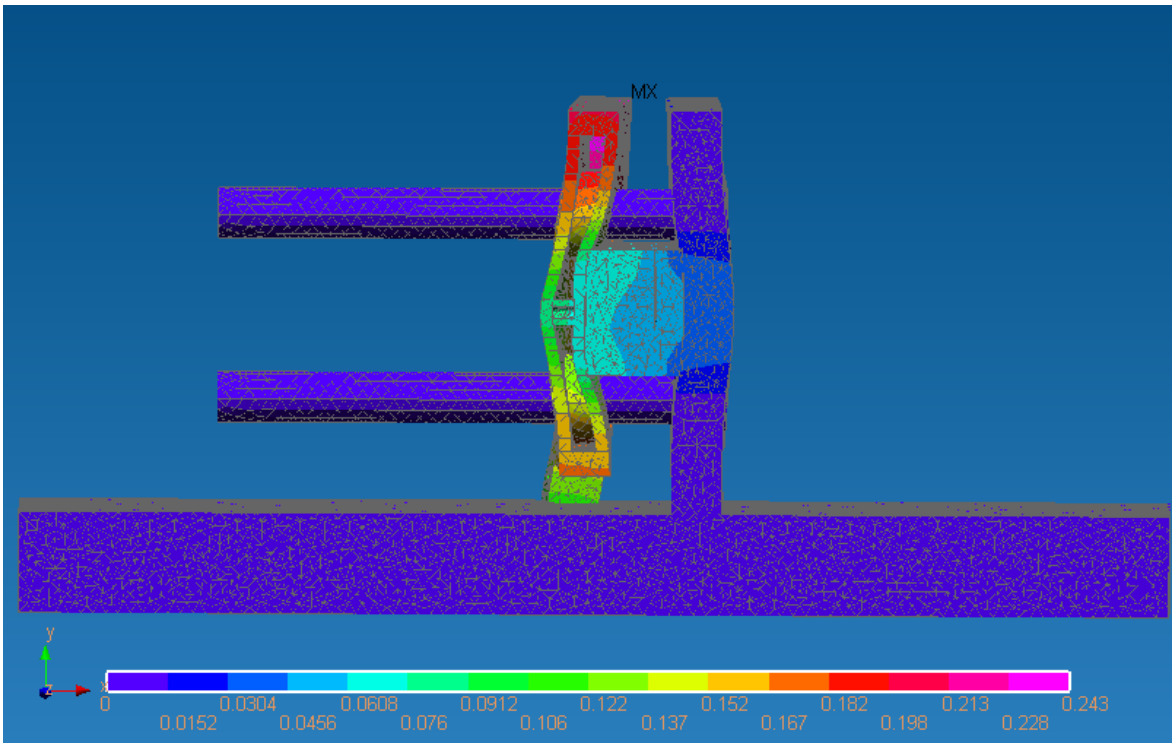


Рис.11. Перемещения в элементах машины, плита полая с приливами под колонны и механизм выталкивания

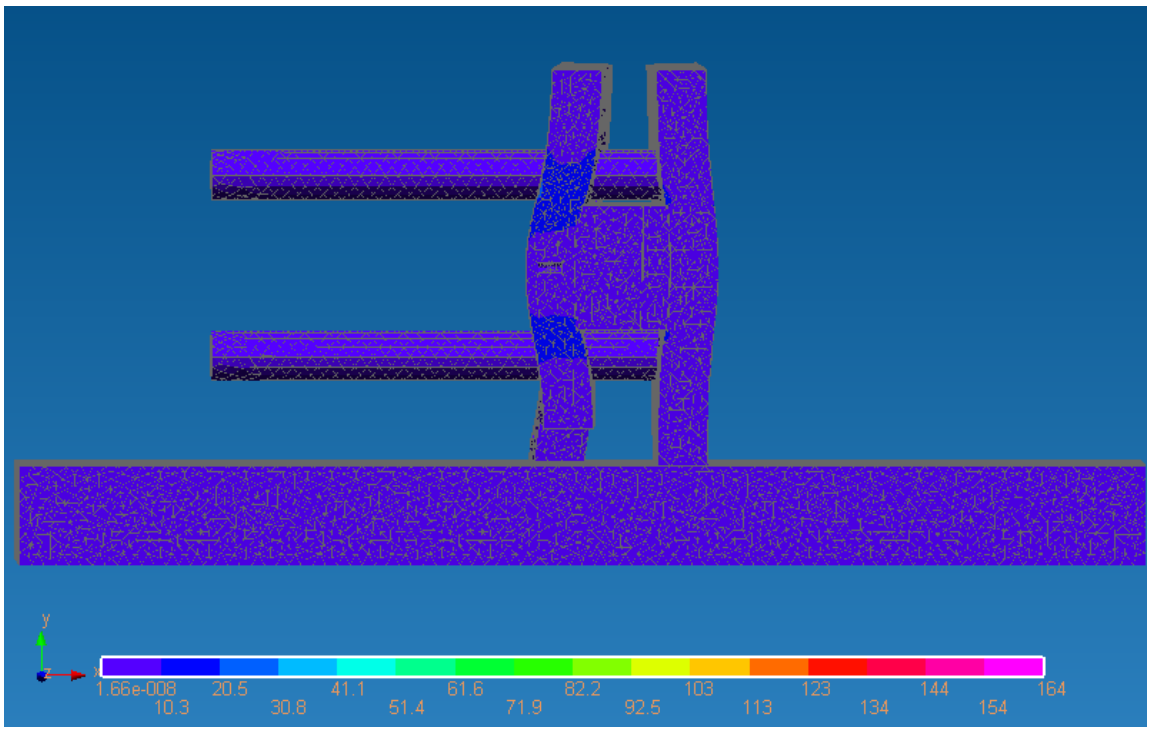


Рис.12. Напряжения в машине, плита полая с приливами под колонны и механизм выталкивания, с ребрами жесткости

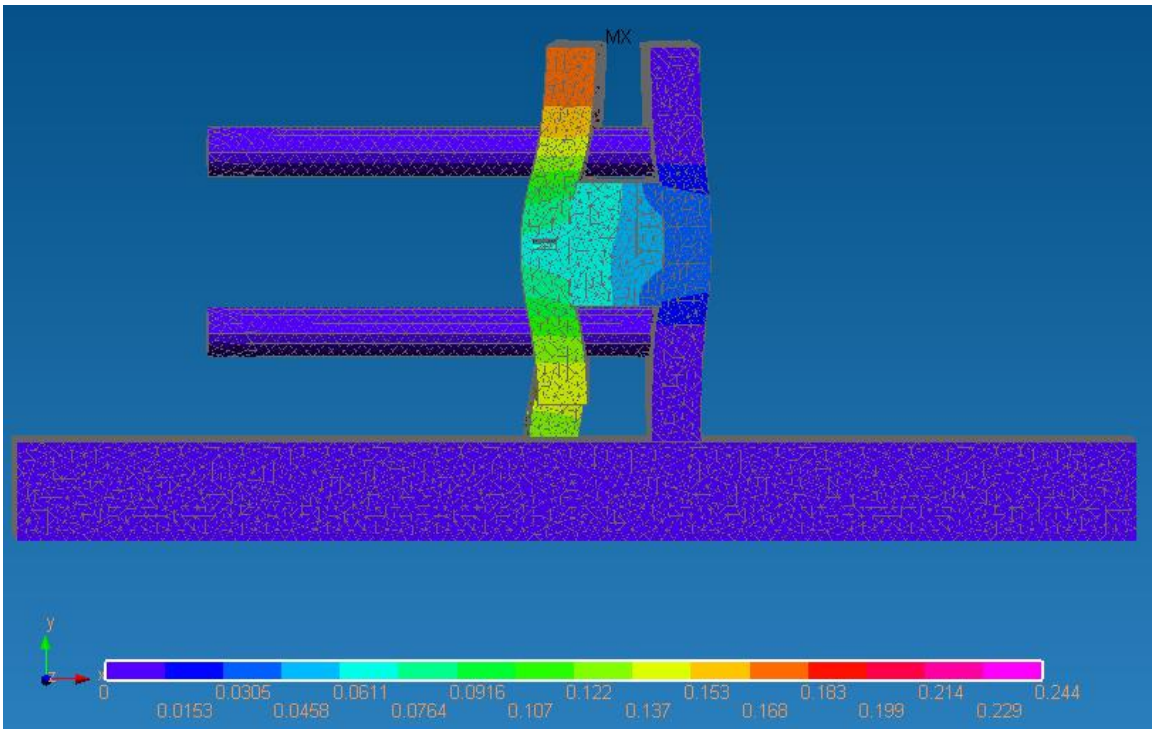


Рис.13. Перемещения элементов машины, плита полая с приливами под колонны и механизм выталкивания, с ребрами жесткости

На основании полученных данных можно сделать вывод, что наилучшим образом себя показали плиты 1 и 4. Однако, плита 4 легче плиты 1, при сохранении высокой жесткости. Поэтому рекомендуется подвижную плиту выполнять по модели 4.

При невысокой культуре производства, возможны перекосы из-за непараллельности плит пресс-формы и смещении равнодействующей в пресс-форме силы относительно центра плиты. Поэтому были смоделированы ситуации со смещением центра приложения силы в пресс-форме вниз и вверх относительно центра подвижной и

неподвижной плиты. В результате, при неточной установке пресс-формы наблюдается неравномерное напряженное состояние плит и повышенные напряжения в бронзовых вставках плит для колонн. Однако на качестве запирания машины неточность установки не влияет.

Таким образом, механизм запирания спроектированной машины литья под давлением является полностью работоспособным и возможные проблемы в работе были устранены в процессе проектирования.

Литература

1. АПМ. Научно - технический центр. Официальный сайт. URL. www.apm.ru/rus/
2. «Исследование напряженного состояния механизма запирания машины литья под давлением», курсовой проект по курсу «Основы научных исследований», Ильющенкова В.С., 2013.
3. Ильющенкова В.С. Двухплитная машина литья под давлением. Молодежный научно-технический вестник, 08, 2013.

УДК 621.74.043.2

ВЛИЯНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ НА РАБОЧУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ПРЕСС-ФОРМЫ ПРИ ЛИТЬЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Дмитрий Владимирович Майер,
студент 6 курса,
кафедра «Литейные технологии»,
Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.А. Мандрик,
доктор технических наук, доцент кафедры «Литейные технологии»

Обеспечение длительной работоспособности пресс-форм является одной из важных проблем при изготовлении качественных отливок и снижении затрат при обслуживании оснастки.

К основным дефектам, приводящим к выводу пресс-формы из эксплуатации, относят: трещины и сетку разгара на формообразующих поверхностях, смятие в стыке вкладыш-вкладыш и стержень-вкладыш, изменение формы стержней, коробление, налипание и приваривание сплава на рабочие поверхности пресс-формы. При литье алюминиевых сплавов снижение стойкости пресс-форм связано в первую очередь с термической усталостью, формоизменением и износом. Согласно статистическим данным [4] доля дефектов во вкладышах и стержнях пресс-форм примерно таковы: трещины и сетка разгара – 32% и 4%, пригар и приваривание – 16% и 35%, смятие – 18% и 5%, изменение размеров после устранения пригара – 7% и 30%, износ – 13% и 13%, механические повреждения – 8% и 11% соответственно.

Термическая усталость материалов – это явление, которое проявляется в виде сетки трещин на металлических изделиях, работающих при циклически изменяющихся температурах и напряжениях. Вначале на частично окисленной рабочей поверхности пресс-формы появляются мелкие пересекающиеся между собой трещинки, разбросанные по разным направлениям. С увеличением числа циклов теплосмен на поверхности образуются замкнутые петли, размер и рисунок которых разнообразны. При дальнейшем увеличении циклов теплосмен глубина и ширина трещин увеличивается. Заливка жидкого металла под давлением в пресс-форму с такими дефектами приведет к образованию заливов различной формы на поверхности отливок. Появление микротрещин,

охрупчивание, а затем разрушение материала вкладыша пресс-формы возникает тогда, когда температурные напряжения (при отсутствии механических усилий) превосходят истинное сопротивление разрыву материала в данном месте через какое-то число циклов теплосмен.

Критерием оценки термостойкости материалов при литье под давлением является число циклов теплосмен, то есть количество запрессовок жидкого металла в пресс-форму до появления сетки разгара.

Трещины бывают поверхностными, уходящими в глубину, внутренними в виде сетки мелких трещин и частичного отслаивания, выходящего на поверхность, а также в виде микротрещин, распространенных по всему объему, как результат фазовых превращений. Образование трещин обусловлено наличием температурных растягивающих напряжений:

- напряжения I рода – микроскопические зональные напряжения (охватывают целые области детали и имеют ориентацию, связанную с формой изделия);
- напряжения II рода – микроскопические напряжения (распространяются на отдельные зерна или группу зерен);
- напряжения III рода – субмикроскопические напряжения (относятся к искажениям атомной решетки).

На основе производственный данных установлено, что общий срок эксплуатации пресс-форм состоит из двух периодов. Первый период длится до момента появления трещин термической усталости. Второй период определяется длительностью развития трещин термической усталости до критических размеров, при которых дальнейшая эксплуатация пресс-форм становится практически невозможной. При этом длительность первого периода значительно меньше второго. Поэтому поведение материалов на начальной стадии эксплуатации пресс-форм до появления трещин обычно оценивают «термостойкостью», а на стадии их дальнейшего развития до разгара – «разгаростойкостью».

За счет возникновения адсорбционно-поверхностных эффектов на поверхности рабочей полости пресс-формы возможно появление трещин при первых запрессовках, что вызвано взаимодействием жидких металлов или газов с твердым металлом. Данное явление называют эффектом Ребиндера, к особенностям которого относят быстроту взаимодействия и резкое снижение механических свойств материала поверхности, в результате чего происходит разрушение за минуты и затем секунды. Хрупкость под действием жидких металлов хорошо изучена применительно ко многим условиям работы материалов, но относительно работы пресс-форм этот вопрос еще недостаточно исследован. Поэтому при быстром разрушении пресс-форм и анализе его причин необходимо иметь в виду и эффект Ребиндера.

Вследствие нелинейности межатомной связи все тела при нагревании изменяют свои размеры. Параметры решетки принимают прежние значения при возвращении к исходной температуре. В реальном теле происходят физические явления, не обладающие обратимостью, что приводит к появлению остаточного формоизменения. Изменение размеров согласно опытным данным составляет примерно около 1 % за цикл от теплового расширения [1].

Ростом называют процесс необратимого формоизменения твердых тел из-за повторных теплосмен. Обоснуют явление роста как результат напряжений, возникающих по причине неодинаковых расширений прилегающих макро- и микрообластей материала. Релаксация напряжений сопровождается пластической деформацией, приводящей к изменению размеров тела.

Формоизменение в пресс-формах проявляется в виде роста, коробления, смятия и пластического перемещение металла (вымоины, вмятины). В процессе работы острые углы деталей пресс-форм, омываемые жидким металлом, теряют свою форму. Причиной этого явления может быть пластическая деформация или гидродинамический унос

металла. Выступы внутренней полости и выталкивателей теряют свою исходную форму, приближаясь к шарообразной, что способствует образованию заливов на поверхности отливок.

Явление роста в пресс-формах проявляется редко, так как их поверхность нагревается с одной стороны. По причине нагрева по всей окружности стержни нередко увеличиваются по длине, но уменьшаются при этом в диаметре.

Коробление наблюдается как отдельных выступающих частей, так и всего вкладыша и даже блока, особенно по разъему. Чем выше температура заливаемого металла, тем интенсивнее проявляются все дефекты, в том числе и коробление.

Из-за пластической деформации и гидродинамического уноса возникают вымоины и вмятины. Устранение смятия сводится к выбору материала для изготовления вкладышей пресс-форм и режимов литья, которые могли бы обеспечить при температуре контакта больший предел текучести, чем возникающие максимальные температурные напряжения. При литье алюминиевых сплавов соблюдать это условие сложно.

Износ пресс-формы в широком смысле следует понимать как изменение чистоты рабочей поверхности и соответственно чистоты поверхности получаемых отливок. Износ рабочей полости пресс-форм и металлопроводов по сравнению с обычным износом явление сложное, так как трение здесь происходит при соприкосновении с жидким металлом при больших скоростях, гидродинамических ударах и при высоком конечном удельном давлении. Кроме того, действуют и другие факторы.

Чистота поверхности изменяется в зависимости от материалов, применяемых для изготовления отливок. Так, с повышением температуры плавления сплавов чистота поверхности снижается. Снижение чистоты поверхности рабочей полости пресс-форм и отливок тем интенсивнее, чем выше температура плавления материала отливок. С увеличением числа циклов теплосмен величина шероховатости поверхности возрастает и на каком-то цикле она превысит уровень технических требований на отливку. Это число циклов теплосмен и является износостойкостью пресс-формы.

Износ в виде истирания (трение, смятие), химического взаимодействия (коррозия, химические реакции), диффузии, дислокации, вакансий имеет место на всей рабочей поверхности, а кавитация, эрозия, гидродинамический унос, пластическое течение металла наблюдается только в отдельных местах. Износу трением, приводящему к задирам на трущихся поверхностях, особенно сильно подвержены пары: поршень-стакан и стержень-отливка. От действия струи жидкого металла, содержащего твердые частицы металла, также возникают задиры на рабочей полости пресс-форм.

Химическое взаимодействие металлов вкладыша и отливок проявляется в виде коррозии и различных химических реакций с образованием окислов, нитридов и других химических соединений, приводящих к изменению состава стали вкладышей пресс-форм на ее рабочей поверхности и изменению механических свойств, а также стойкости. Образующиеся химические соединения в большинстве случаев являются хрупкими и под действием струи жидкого металла выкрашиваются, образуя поры на рабочей поверхности вкладыша и повышенную шероховатость на поверхности отливок. В результате химического взаимодействия вкладышей пресс-форм с отливкой снижается их износостойкость и чистота поверхности рабочей полости.

Дислокации и вакансии перемещаются в сторону высоких температур и выходят на поверхность вкладышей пресс-форм, образуя мелкие поры, что приводит к возникновению шероховатости на поверхности отливок, снижая их чистоту.

Физическое взаимодействие жидкого металла отливки с материалом вкладыша пресс-форм проявляется в виде диффузии, фазовых превращений, эрозии, кавитации, гидродинамического уноса, адсорбционно-поверхностных эффектов и др.

В основе налипания и приваривания алюминия к поверхности стержней и рабочей полости лежит процесс диффузии. Около 65% стержней выходит из строя из-за приваривания к ним металла отливки. В работе [2] установлено, что при изготовлении

отливок из алюминиевых сплавов во вкладышах из стали 3Х2В8Ф после выхода их из строя на глубине 0,25-0,55 мм содержание алюминия достигало 0,74%, а на глубине 4,75-7,55 мм – 0,58%. Исходная сталь практически не содержала алюминия.

В местах удара струи жидкого металла о преграду (стержень, стенка и т. д.) при применении больших скоростей впуска и течения с высокими удельными давлениями наблюдается явление кавитации и эрозии. Разрушение от кавитации и эрозии в большинстве случаев носит локальный характер. Чаще всего оно сопровождается повышенной пористостью и другими видами износа рабочей поверхности.

Вымоины наблюдаются в местах падения струи жидкого металла и в местах ее удара о преграду и появляются из-за пластической деформации или гидродинамического уноса металла. При пластической деформации металл только перемещается на некоторое расстояние и остается, образуя около вымоин возвышенность. При гидродинамическом уносе металл удаляется вместе со струей. Этим и отличается образование вымоин по причине пластической деформации от гидродинамического уноса.

По причине износа возникает много различных дефектов, но наиболее широкое распространение при литье под давлением алюминиевых сплавов имеет пригар и приваривание расплава на рабочие поверхности вкладышей пресс-форм. Образование пригара является результатом интенсивного диффузионного и химического взаимодействия компонентов расплава (Al и Si) с материалом пресс-формы. Разность скоростей диффузии алюминия и железа приводит к повышению концентрации вакансий, их слиянию и образованию слоя микропор под поверхностью стальной пресс-формы. Наличие такого слоя под пригаром является основной причиной разрушения стальных пресс-форм при извлечении отливок [3].

Циклическое воздействие температуры и напряжений в пограничном слое приводит к изменению строения металла за счет возникающих процессов сфероидизации и коагуляции отдельных фаз. Это приводит к изменению механических свойств металла. Разупрочнение и упрочнение материала деталей пресс-форм в пограничном слое происходят тем интенсивнее, чем выше температура контакта. Разупрочнение и упрочнение происходят вследствие теплового воздействия, вызывающего рекристаллизацию, возврат, старение, полигонизацию и другие процессы.

Исследования [3], которые проводились в Тюменском Государственном Нефтегазовом Университете на кафедре материаловедения и конструкционных материалов, показали между налипшим алюминием и материалом инструмента наличие диффузионного слоя, что обуславливает высокую степень сцепления сплава с поверхностью вкладыша. Рентгеноструктурный анализ поверхности в месте налипания алюминиевого сплава обнаружил диффузионный слой, состоявший из твердого раствора Al в α -Fe с интерметаллидами $FeAl_3$, Fe_2Al_5 и сложным интерметаллидом Al_4Si_2Fe, образование которого связано с присутствием в расплаве Si. Параметры решетки α -Fe отличались от параметров, полученных с поверхности пресс-формы, не участвующей в контакте с материалом отливки. Учитывая результаты вышеуказанных микроскопических исследований, можно предположить, что изменение периода решетки произошло вследствие насыщения поверхности пресс-формы алюминием.

При исследовании пригара на поверхности пресс-формы с помощью растровой электронной микроскопии установлено, что налипший алюминиевый сплав имеет явно выраженное слоистое строение (рисунок 1), обусловленное цикличностью заливки металла. В местах пригара расплава также обнаружены игольчатые кристаллы интерметаллидов на рабочей поверхности пресс-формы, рисунок 2.

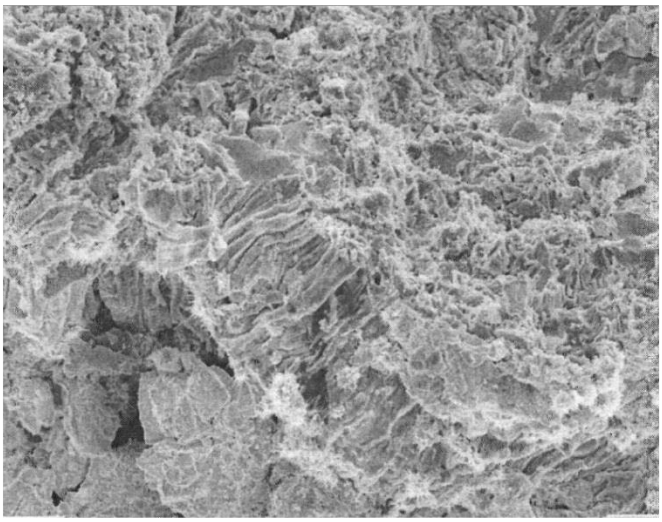


Рис. 1. Пригар на поверхности пресс-формы, увеличение 500

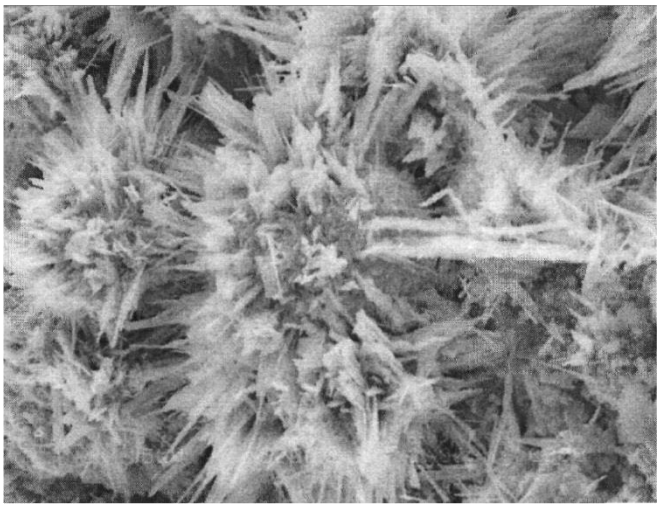


Рис. 2. Игольчатые кристаллы интерметаллидов на рабочей поверхности пресс-формы, увеличение 5000

В реальных условиях промышленного производства продолжительность контакта поверхностей алюминиевого сплава и пресс-формы невелика (длительность одного контакта составляет 6-15 секунд). Однако количество теплосмен до разрушения пресс-формы достигает сотен и тысяч, причем каждый раз сталь взаимодействует с новой порцией расплава, свободной от продиффундировавших в предыдущую отливку компонентов материала формы, то есть градиент их концентрации в расплаве в начальный период контакта весьма высок, что способствует увеличению диффузионного потока и разрушению литейной формы. Ускорению диффузии алюминия в материал пресс-формы способствует повышенное давление формирования отливки. Тепловое расширение стали при впуске расплава и последующая ее усадка в процессе охлаждения создают растягивающие внутренние напряжения, которые также благоприятствуют насыщению стали алюминием.

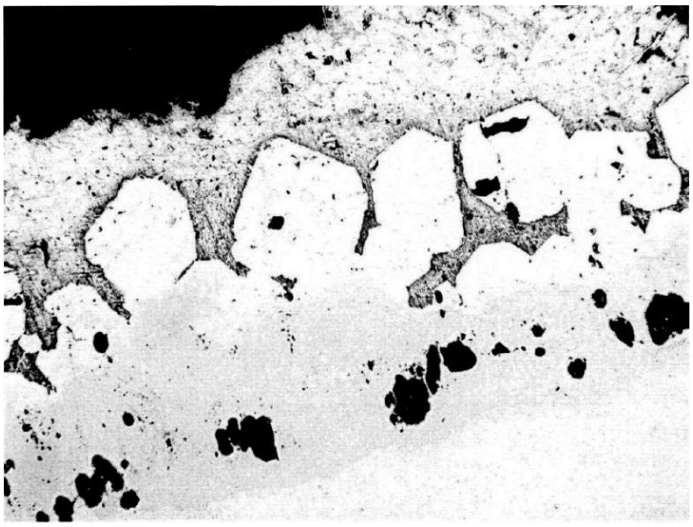


Рис. 3. Структура переходной зоны контакта стали 4Х5МФС с закристаллизовавшимся сплавом АК9, увеличение 300

На рисунке 3 показана микроструктура переходной зоны контакта образца из стали 4Х5МФС с затвердевшим сплавом АК9. Переходная зона включает тонкий (не более 10 мкм) слой твердого раствора Al в α -Fe с твердостью более высокой, чем основной металл, затем следует слой алюминидов железа с толщиной 150-180 мкм. В структуре переходного слоя хорошо заметны поры размером от 5 до 40 мкм, располагающиеся между слоями твердого раствора Al в α -Fe и алюминидов. Полости критических размеров могут зарождаться вблизи интерметаллидов $FeAl_3$ и Fe_2Al_5, обладающих повышенной хрупкостью по сравнению с твердым раствором алюминия в α -Fe. Можно также отметить различие между кристаллическими решетками алюминидов относительно твердого раствора, что приводит к дополнительным локальным напряжениям.

Обнаружение отдельных пор и группы микропор в поверхностных слоях пресс-формы позволяет предположить, что их образование связано с продвижением фронта диффузии алюминия в матрицу и взаимной диффузии атомов железа в затвердевший сплав. Поскольку коэффициент диффузии Al в α -Fe значительно выше коэффициента диффузии атомов железа в Al, позади фронта быстро диффундирующего элемента в матрице повышается концентрация вакансий, то основным механизмом диффузии в металлах является вакансионный. Повышение концентрации вакансий приводит к появлению бивакансий, вакансионных групп и, в конечном счете, к образованию микропор.

Итак, разрушение пресс-формы начинается с ее рабочей поверхности, так как она испытывает самые высокие температуры, деформации, напряжения и химические взаимодействия с жидким металлом. Применение смазок, химико-термической обработки (азотирование, низкотемпературное цианирование, сульфидирование и сульфоцианирование, фосфатирование), физико-химической обработки (электролитическое хромирование, электролитическое никелирование), специальных видов обработки (поверхностная лазерная закалка, поверхностная плазменная обработка без оплавления, ультразвуковая обработка), а также защитных покрытий (вольфрамовые, молибденовые, керамические) для повышения стойкости пресс-форм обеспечивает увеличение длительности их работы.

В процессе работы пресс-формы через определенное количество циклов теплосмен необходима промежуточная обработка вкладышей для очистки поверхности и снятия внутренних растягивающих напряжений. Метод обработки и интервал обслуживания выбирается с учетом опыта работы конкретного литейного цеха.

Использование смазок для пресс-форм должно быть обязательным в технологическом процессе изготовления отливок, так как оно помогает повысить качество

поверхности отливок, снизить вероятность образования пористости, повысить коррозионную стойкость вкладышей и стабильность химического состава и структуры литейного сплава, повысить производительность.

Следующим шагом для повышения стойкости пресс-форм является применение системы термостатирования вкладыша. Для этого во вкладыше выполняются каналы, по которым течет жидкость определенной температуры. Термостатирование позволяет снизить температуру контакта и скорости диффузии, что приводит к уменьшению вероятности приваривания сплава. Также термостатирование стабилизирует температурный перепад, при увеличении которого появление температурных напряжений и общей деформации возрастает.

Конфигурация литниковой системы влияет на скорость, плавность, одновременность заполнения пресс-формы. Грамотная проработка конструкции литниковой системы снизит до минимума появление бракованных отливок и увеличит длительность работы пресс-формы.

Таким образом, в данной работе были рассмотрены основные процессы взаимодействия алюминиевых сплавов с поверхностью пресс-формы, основные дефекты в поверхностном слое материала оснастки, а также способы и методы повышения стойкости пресс-форм. Пресс-форма, являясь одновременно оснасткой и литейной формой, оказывает сложное и многогранное влияние как на качество отливок, так и на технико-экономические показатели литья. Обеспечение длительной работоспособности пресс-форм является одной из важных проблем при изготовлении качественных отливок и снижении затрат при обслуживании оснастки.

Литература

1. *Вигдорович В.Н., Глазов В.М., Глаголева Н.Е.* Цветная металлургия. - 1960. № 2.- С. 143-146.
2. *Горюнов И.И.* Пресс-формы для литья под давлением. Справочное пособие. Л.: Машиностроение, 1973, 256 с.
3. *Денисов П.Ю.* Характер взаимодействия сплавов алюминия с поверхностью пресс-форм. Новые материалы и технологии в машиностроении: Материалы регион. н.-т. конф. Тюмень, 2003. - С. 29.
4. *Шендеров И.Б., Павлов В.И., Яшенькина Н.Ф.*. Анализ состояния рабочих поверхностей форм при литье медных сплавов под давлением. Литейное производство. - 1994. №9.- С. 20-21.

УДК 67.02

КОМПОЗИТНЫЕ СВЯЗУЮЩИЕ ДЛЯ ОБОЛОЧЕК ХУДОЖЕСТВЕННОГО ЛИТЬЯ

Эльвира Леонидовна Панева, Наталья Александровна Тарасова,
студенты 5 курса,
кафедра «Машины и технологии литейного производства»,
Университет машиностроения

Научный руководитель: В.Э. Нутрихин,
старший преподаватель кафедры «Машины и технологии литейного производства»

В художественном (особенно в ювелирном) литье широко применяются водные формовочные массы на гипсовом связующем и фосфатных связующих, образующие так называемые монолитные формы. Гранулометрический состав этих масс представлен

частицами в основном до 20 мкм, и газопроницаемость этих масс невысока, и, следовательно, требуют длительного высокотемпературного прокаливания перед заливкой. Заливаемые в такие формы расплавы металлов контактируют только с рабочими полостями литейной формы, которые хорошо воспроизводят микрорельефы художественных изделий, все остальные компоненты, находясь в тонкодисперсном состоянии, не участвуют в контакте с металлом, а только формируют литейную форму. Послойная технология формирует литейную форму в виде оболочек на таких связующих как этилсиликат и кремнезоль. Эти формы содержат гораздо меньше пылевидной фракции, поскольку она входит в состав суспензии, который, начиная с первого слоя, обсыпают зернистым наполнителем, что обеспечивает более высокую газопроницаемость литейной формы, и таким образом ускоряет режимы термической обработки. Кроме того монолитные формы в некоторых случаях склонны к трещинообразованию во время прокаливания, особенно в переходах к стержневым элементам из-за сложных объемных превращений (расширение, усадка), оболочки при термической обработке более устойчивы к трещинам.

Важный момент - все формовочные массы для монолитных форм - иностранного производства. В целях развития применения фосфатных жидкостекольных композиций для оболочковых форм приведены испытания на $Б_{изг.}$ образцов оболочек из этих материалов (1),(2). Необходимо было определить временные выдержки между нанесением каждого слоя с целью выявления минимальных интервалов и, таким образом, времени формирования таких оболочек. Результаты испытаний представлены на рис.1.

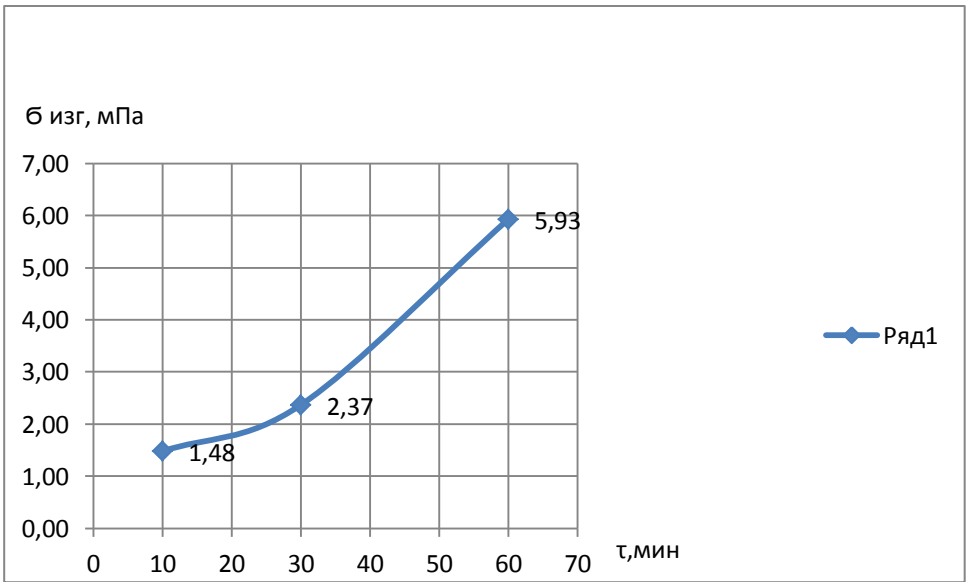


Рис.1 Зависимость прочности образцов на изгиб от интервала нанесения слоев суспензии.

$\tau_{мин.}$- интервал между нанесением пар суспензий- жидкостекольной с ПАВ и алюмофосфатной на кварцевых наполнителях с обсыпкой каждого слоя кварцевым песком.

Как видно из графика результат кислотно-основного взаимодействия связующих приводит к тому, что уже через 10 мин. (при трех парах слоев с интервалом 10 мин.) оболочка приобретает прочность, при увеличении интервалов прочность растет.

Если сравнить чисто жидкостекольные или чисто фосфатные образцы оболочек, то видно, что они не обладают и 10% прочности композитного состава, только воздушная сушка требует суточных интервалов, и даже это не спасет от разрушения такую оболочку при взаимодействии с выплавляющимся модельным составом.

Для качественной поверхности, формируемой жидкостекольной суспензией на выплавляемых моделях, в нее необходимо добавлять ПАВ и пеногаситель- для обеспечения хорошей смачиваемости и отсутствия пузырей. В качестве ПАВ применен

жидкий сульфоэтоксилат натрия, а в качестве пеногасителей Пента 465, 461, концентрация которых зависит от содержания воды в связующем и концентрации пылевидного наполнителя.

Апробированы также варианты, где в качестве первого слоя применен кремнезоль и гидролизованный этилсиликат для сравнения параметров качества поверхностей художественного литья. В случае кислого гидролиза этилсиликата выявлена возможность нанесения укрепляющего жидкостекольного слоя с минимальным временным интервалом 10 мин. второго слоя от первого (в этом случае также имеет место кислотно-основное взаимодействие связующегих, но прочность настолько мала,что использовать этот прием не представляется возможным).

Прочностные показатели оболочек с первым слоем на этилсиликате и двумя парами жидкого стекло и фосфата не имеют существенного отличия от безэтилсиликатного состава.

Экспериментальные художественные отливки, полученные на испытанных составах, представлены на рис.2, которые показали, что отливки пригодны к дальнейшей обработке, а мелкие дефекты связаны с методикой подготовки суспензий - скорость, способов перемешивания. Возможно, требуется скоростная мешалка закрытого типа.



Рис.2 Образцы художественных отливок.

Испытание оболочек через сутки показало их прочность на изгиб более 10мПа, что позволяет снизить концентрацию водных связующих при изготовлении литейных форм (в качестве опорного наполнителя удобно использовать гипсо-песчаные смеси с содержанием 20% воды, а в монолитных формах - около 30% воды).

Все материалы, связанные с оболочковыми формами, изготовлены в России.

Методика изготовления образцов для испытания на $б_{изг}$ состоит в следующем: образец из модельного состава в виде пластины (с припаянным держателем) размером 20х50х2 окунали в заранее приготовленную суспензию, обсыпали кварцевым песком с двух сторон, зачищали нанесенный слой по тонкой длинной стороне образца инструментом и наносили второй слой с обсыпкой и зачисткой ребра– с целью формирования пластины до сушки для более легкого отделения, формирования необходимой ширины и, главное, предотвращения трещинообразования при резке прочного образца рис.3.



Рис. 3 Образцы оболочки, нанесенные на пластину из модельного состава.

Исходный состав суспензии для первого(третьего, пятого) слоя в масс. процентах :

– жидкое стекло– 25,6

– сульфоэтоксилат натрия (ПАВ №1) – 0,18

– пылевидный кварц– 66,55

– вода– 7,68

Исходный состав суспензии для второго(четвертого, шестого) слоя в масс. процентах:

–алюмохромфосфат–25,6

– пылевидный кварц– 66,67

– вода– 7,69

Для оценки скорости кислотно-основного взаимодействия суспензии приняты следующие интервалы нанесения парных слоев обмазок– между первым жидкостекольным и вторым фосфатным интервала нет, через 10 мин. наносится вторая пара слоев, а еще через 10 мин.– третья пара. Через 10 мин. проводятся испытания на $б_{изг}$. Следующие интервалыприняты 30 и 60 мин., с испытаниями на прочность через 30 и 60 мин. соответственно. Суточная прочность более чем в 2 раза превышает прочность 60 минутных образцов.

Для испытания качества поверхности отливок приняты тонкостенные художественные отливки в виде звездочек рис.4.



Рис.4 Контрольная отливка «звездочка» из сплава ЛЦ40С (состав №1 таблица 1)

Поскольку полость литейной формы образует первый слой суспензии, а остальные только упрочняют ее, то именно в первый слой суспензии(жидкостекольный) и добавляли пеногасители, а концентрацию поверхностно активного вещества (далее ПАВ) довели до 0,4% для гарантийного смачивания суспензией художественного рельефа моделей–звездочек.

Составы испытанных суспензий приведены в таблице 1.

Упрочняющий фосфатный слой суспензий везде одинаковый. Полученные образцы звездочек с тремя парами слоев напаяли на стояк из модельного состава, прикрепив к ним номера из модельного состава. Затем весь блок заформовали самотвердеющей наливной формовочной массой, сформировав тем самым прочный опорный наполнитель. Состав формовочной массы содержит:

– гипс Г-16 – 20%

– пылевидный кварц – 20%

– кварцевый песок –60%

– вода – 28% (сверх 100% сухих компонентов)

Через 2 часа опорный наполнитель приобрел необходимую прочность и весь блок в течение трех часов при 180 град. Цельсия прошел операцию выплавления модельного состава, а затем и прокаливания в течение пяти часов при температуре 730 град. Цельсия. При температуре полученной литейной формы равной 450 град. Цельсия блок был залит расплавом латуни ЛЦ40С.

Таблица 1. Составы суспензий

№	Состав композитного связующего	№ пеногасителя	Количество пеногасителя, масс.%%	Количество образцов, шт.
1	Состав №1: – жидкое стекло– 25,6 – пылевидный кварц– 66,55 –сульфоэтоксилат натрия (ПАВ №1)– 0,4 – вода– 7,68	–	0	2
2	Состав №1	461	0,4	2
3	Состав №1	461	0,8	2
4	Состав №1	461	1,2	2
5	Состав №1	465	0,4	2
6	Состав №1	465	0,8	2
7	Состав №1	465	1,2	2
8	Контрольная этилсиликатная суспензия	–	–	2

Полученные отливки с различными пеногасителями (461 и 465) представлены на рис.5



а) б) в)

Рис.5. Отливки из сплава ЛЦ40С. а-пеногаситель 461, б- пеногаситель 465, в- без пеногасителя.

Принципиального отличия между образцами не обнаружено. Однако количество дефектов на отливках с пеногасителем 465 больше, чем с 461. А композитный состав без пеногасителя имеет незначительное количество мельчайших шаровидных приливов размером до 0,2 мм. Поэтому дальнейшая работа проводится с использованием шаговых концентраций различных ПАВов и пеногасителей с целью минимизации шаровидных приливов.

Отливки полученные этилсиликатным связующим близки по шероховатости к композитным составам, но имеют еще меньше шаровидных приливов.

Выводы

– все формовочные материалы для композитной технологии- российского производства

– именно окислительно-восстановительное (химическое) взаимодействие связующих позволяет осуществить скоростной получасовой интервал нанесения слоев

– первым слоем композитных оболочек является жидкостекольная суспензия из-за того, что фосфатная суспензия имеет много газовых пузырей не убираемых пеногасителями

– в первый слой жидкостекольной суспензии необходимо добавлять ПАВы и пеногасители, минимальная концентрация которых составляет 0,5%

–минимальный интервал нанесения парных композиций составляет полчаса

–скоростным опорным наполнителем является гипсопесчаная формовочная масса

– в течение одного рабочего дня имеется возможность получить художественные отливки из медных сплавов (при массах форм до 5 кг.)

– качество литья приближается к стандартным этилсиликатным композициям.

Литература

1. Нутрихин В.Э. Применение фосфатных связующих для художественного литья.//Литейщик России №1 2013.-С.20–22.
2. Литье по выплавляемым моделям / под общ. ред. Я.И. Шкленника, В.А. Озерова. –М.: Машиностроение,1984.-408с

Секция VI

Оборудование и технологии обработки давлением

Председатель:	**Евсюков Сергей Александрович** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии обработки металлов давлением» (МТ-6)
Ученый секретарь:	**Белокуров Олег Александрович** кандидат технических наук, доцент кафедры МТ-6
Ответственный секретарь:	**Аленнов Максим Геннадьевич**, ассистент кафедры МТ-6

УДК 621.777.001.57

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГОРЯЧЕГО ОБРАТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА QFORM 2D

Геворк Славикович Софоян,
магистрант 1 года обучения,
кафедра «Технологии формообразования и художественная обработка давлением»,
Донской государственный технический университет

Научный руководитель: Б.С. Мороз[(2)],
доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии формообразования и художественная обработка давлением» Донского государственного технического университета

В условиях рыночной экономики сокращение времени на технологическую подготовку производства новых изделий является одной из актуальных задач. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением позволяет существенно сократить эту процедуру, минимизировать временные и финансовые затраты на разработку технологии, практически исключает необходимость доводки соответствующей оснасти после её изготовления, что обеспечивает снижение себестоимости получаемых полуфабрикатов и изделий.

Обратное выдавливание полых изделий достаточно широко применяется в обработке металлов давлением различных металлов и сплавов с середины прошлого столетия. Наиболее широкое распространение получило изготовление таких изделий без нагрева заготовки. Что касается трудно деформируемых цветных металлов и сплавов, то рекомендации по проектированию технологических процессов полугорячего и горячего обратного выдавливания для них практически отсутствуют. В справочной и специальной литературе приводятся только приближенные зависимости для расчета силы деформирования и выбора инструмента при деформировании заготовок из сталей [1-3]. Как правило, при проектировании процесса обратного выдавливания цветных металлов и сплавов используются эти рекомендации и общие рекомендации, приведенные в некоторых источниках, но они не позволяют назначить оптимальную геометрию инструмента, рассчитать необходимую величину силы деформирования по ходу процесса и определить конечную геометрию изделия, получаемого обратным выдавливанием [4-5].

В настоящей работе приведены результаты математического моделирования процесса обратного выдавливания стакана с наружным отростком в донной его части из алюминиевого сплава АК6, полученные с помощью программы QForm 2D [6]. Расчеты выполнены с целью анализа особенностей течения метала заготовки, её напряженного состояния и формоизменения в процессе деформирования во взаимосвязи с изменением силовых параметров процесса.

Исходя из чертежа изделия, были назначены напуски, припуски и допуски на горячую штамповку, разработан её чертеж, рассчитан объем заготовки и с учетом конфигурации внутренней полости изделия назначена геометрия рабочей части пуансона. Размеры заготовки приняты следующими: D_3 х H_3 = 80х100мм. Ниже приведены условия моделирования процесса.

Диаметр рабочей втулки матрицы принят равным 82мм, диаметр рабочего пояска пуансона – 50мм. Рабочая часть пуансона принята следующей геометрии: диаметр торцовой части - 25мм, угол наклона конусной части к оси инструмента - 85^{o}, высота рабочего пояска - 7мм и радиус скругления пояска с его конусной частью - 5 мм. Степень деформации при выдавливании стакана принятых размеров составляет $\varepsilon = = d^2/D^2 = 0{,}372$, где d – диаметр рабочего пояска пунсона, а D – диаметр втулки матрицы.

В соответствии с рекомендациями работы [4] приняты следующие температурно-скоростные и граничные условия деформирования: температура заготовки - 450°С; температура инструмента - 340°С; выдавливание со смазкой инструмента (матрицы, пуансона и торцовой части противопуансона); скорость перемещения пуансона (выдавливание)- 10 мм/с.

Современное программное обеспечение для математического моделирования процессов обработки металлов давлением позволяет получить данные не только о величине и характере изменения силовых параметров исследуемых процессов во время деформирования заготовки, но и сведения об особенностях её формоизменения по ходу деформирующего инструмента и о напряженно-деформированном состоянии заготовки.

В опубликованных источниках об обратном выдавливании обычно приводятся диаграммы сил воспринимаемых при выдавливании пунсоном, что не позволяет судить о величине и характере изменения сил трения между деформируемой заготовкой и поверхностью матрицы даже при выдавливании цилиндрического стакана без отростков.

Информация о составляющих полной силы деформирования особенно необходима для анализа течения материала при осесимметричном выдавливании изделий более сложной конфигурации. Её можно получить осциллографированием процесса, если каждый элемент оснастки (пуансон, матрица и противопуансон – дно матрицы) оснащены соответствующими месдозами для измерения действующих на них сил [7].

В связи с этим для моделирования процесса инструмент принят состоящим из трех элементов (рис. 1 и 2): пунсона (инструмент I) и составной матрицы, включающей в себя собственно матрицу (инструмент II) и её донную часть с полостью для отростка стакана (инструмент III).

На рис. 1 приведена расчетная диаграмма сил, полученная при моделировании процесса в принятых условиях деформирования.

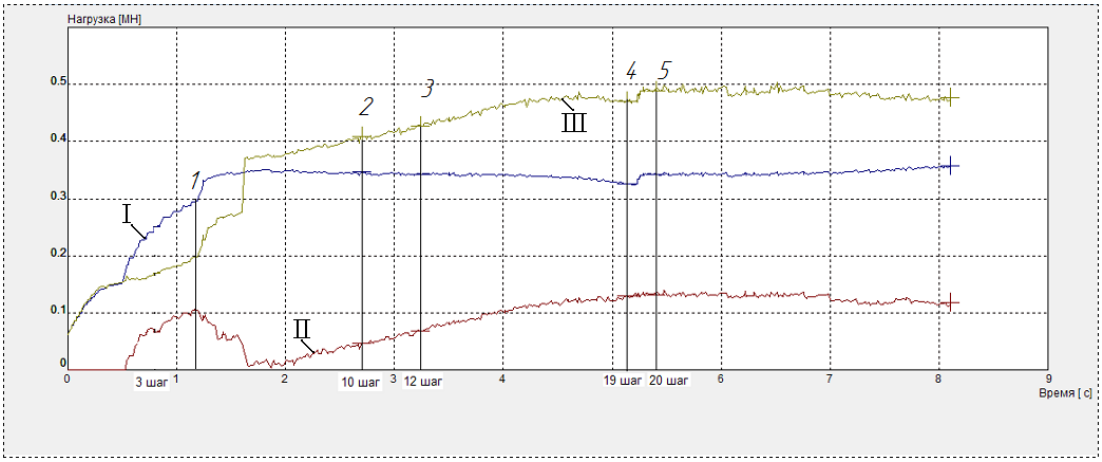


Рис. 1. – Расчетная диаграмма полной силы деформирования и её составляющих:
I - сила, воспринимаемая пуансоном; II – сила трения между заготовкой и матрицей;
III – сила, воспринимаемая противопуансоном (донной частью матрицы);
1 -5 – характерные этапы деформирования

На диаграмме полная сила выдавливания, воспринимаемая противопуансоном равна сумме силы деформирования и силы трения между заготовкой, стенкой выдавливаемой цилиндрической части корпуса стакана и матрицей. Максимальная величина расчетной силы выдавливания равна 0,49 МН, а силы трения около 0,13 МН.

По характерным изменениям полной силы выдавливания (рис 1) и ее составляющих процесс можно разделить на несколько этапов, которым соответствуют изменения характера течения металла выдавливаемой заготовки.

В начале процесса при осадке заготовке до касания ею стенки матрицы сила трения между заготовкой и матрицей отсутствует (0,5 сек. процесса), а силы, приложенные к

пунсону (активная сила) и противопуансону (реактивная сила), равны и растут до касания заготовкой стенки матрицы. При ходе пунсона равном 6мм и соответствующем 0,6 сек (0,15 МН) происходит осадка заготовки до касания ее стенок матрицы (рис. 2.1).

При ходе пуансона 12мм соответствующем 1,2 сек деформирования наблюдается максимум силы трения (P_{Tp} = 0,1 МН) что соответствует полной распрессовке (осадке) заготовки в матрице, и началу заполнения металлом зазора между рабочим пояском пуансона и матрицей при силе выдавливания $P_{П}$ равной 0,3 МН.

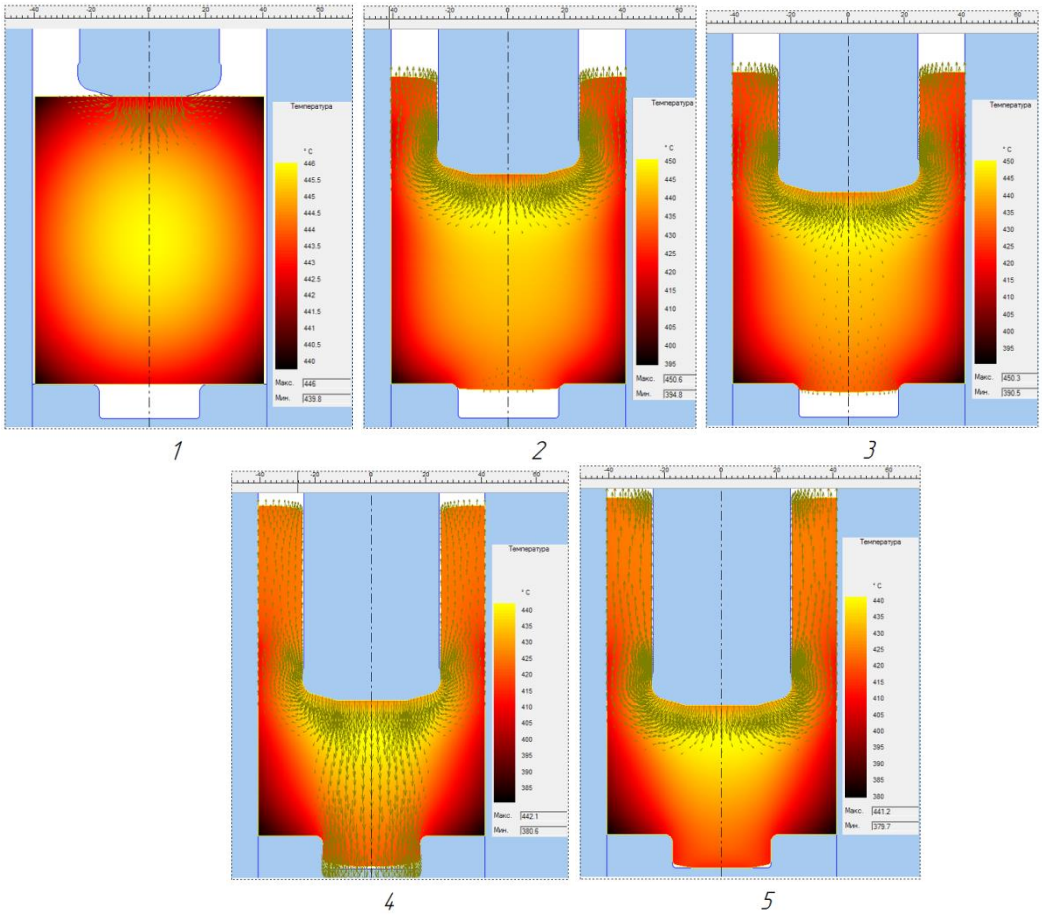


Рис. 2. Векторы скоростей течения металла на характерных стадиях выдавливания заготовки (см. рис. 1)

При дальнейшем перемещении пуансона результирующая сила трения между заготовкой и матрицей сначала уменьшается до нуля, а затем начинает монотонно возрастать примерно до 0,12 МН. Это уменьшение сил трения можно объяснить тем, что по поверхности контакта заготовки матрицей трение носит разный характер. В области вне очага деформации полностью распрессованной заготовки действует трение покоя, а в области очага пластической деформации - трение сопротивления металла, истекающего в зазор между пуансоном и матрицей.

При ходе пуансона (более 15мм) происходит повышение полной силы выдавливания за счет преодоления сил трения между заготовкой и матрицей при установившейся силе деформирования равной примерно 0,35 МН (рис.2.2).

При ходе пуансона примерно в 25мм начинается течение металла в полость донной части матрицы, при этом увеличивается суммарная поверхность трения между заготовкой и матрицей и полостью в донной части матрицы, следовательно, возрастает и величина силы сопротивляющегося трения (рис.2.2-2.4). Это приводит к плавному росту полной силы выдавливания примерно с 0,37 МН до 4,8 МН и некоторому снижению силы приложенной к пуансону (см. рис.1). Снижение силы $P_{П}$ на этом этапе деформирования происходит вследствие частичного течения металла в отросток - в донную часть матрицы.

При ходе пуансона равном 52мм, на графике сил наблюдается незначительное скачкообразное повышение полной силы P_{Σ} выдавливания и силы деформирования $P_{П}$ при максимальном значении силы трения T_K, что соответствует касанию металлом заготовки донной части полости матрицы (рис.2.5).

При дальнейшем ходе процесса наблюдается незначительное увеличение силы $P_{П}$, течение процесса при почти неизменных, несколько снижающихся значениях сил T_M и P_{Σ}, и незначительно повышающейся силе $P_{П}$, что должно соответствовать заполнению металлом углов полости донной части матрицы на стационарной заключительной стадии выдавливания, уменьшению поверхности трения между заготовкой и матрицей вследствие начала выдавливания металла очага пластической деформации в стенку изделия (рис. 2.5).

По результатам расчетов распределение напряжений в объеме деформируемой заготовки неравномерно. Максимальное их значение имеет место в очаге пластической деформации.

Величина среднего напряжения $\sigma_{ср}$ в очаге пластической деформации по оси заготовки изменяется в пределах от 160 МПа в жесткой зоне, прилегающей к торцу пуансона, до 140 МПа на границе с недеформированной частью заготовки.

Максимальная величина сжимающего осевого напряжения σ_z (204 МПа) имеет место в осевой части заготовки в очаге пластической деформации и уменьшается в направлении нижнего торца. В периферийной части заготовки величина этих напряжений остается постоянной около 90 МПа от дна матрицы до очага пластической деформации, а затем снижается до нуля на выходе металла из области заготовки между пояском пуансона и стенкой матрицы.

Величина растягивающих осевых напряжений σ_z имеет место только в области стенки изделия, примыкающей к цилиндрической части калибрующего пояска пунсона в небольшой зоне глубиной не более 2-х мм, несущественно изменяется в этой области по ходу процесса и не превышает 40 МПа.

Величина максимальных радиальных сжимающих напряжений σ_r в очаге пластической деформации по оси заготовки изменяется в пределах от 145 МПа в начале процесса до 168 МПа в конце процесса. Значения σ_r в радиальном направлении снижается от 140 - 165 МПа в очаге пластической деформации дона оси заготовки до 80 МПа у матрицы, а в донной части заготовки растет от 30 МПа на оси до 80 МПа у стенки матрицы.

Анализ искажения расчетной координатной сетки в осевом сечении заготовки и распределения величины напряжения течения металла и средних напряжений в деформируемой заготовке позволяют определить высоту очага пластической деформации у пуансона, которая составляет 0,32 диаметра пуансона d, что согласуется с данными источников литературы.

Величина температуры заготовки в очаге пластической деформации по ходу процесса изменяется несущественно и составляет от 450 до 437^{o}C.

Программа QForm позволяет оценить степень заполнения металлом рельефа деформирующего инструмента и рассчитать форму получаемого изделия (рис. 3).

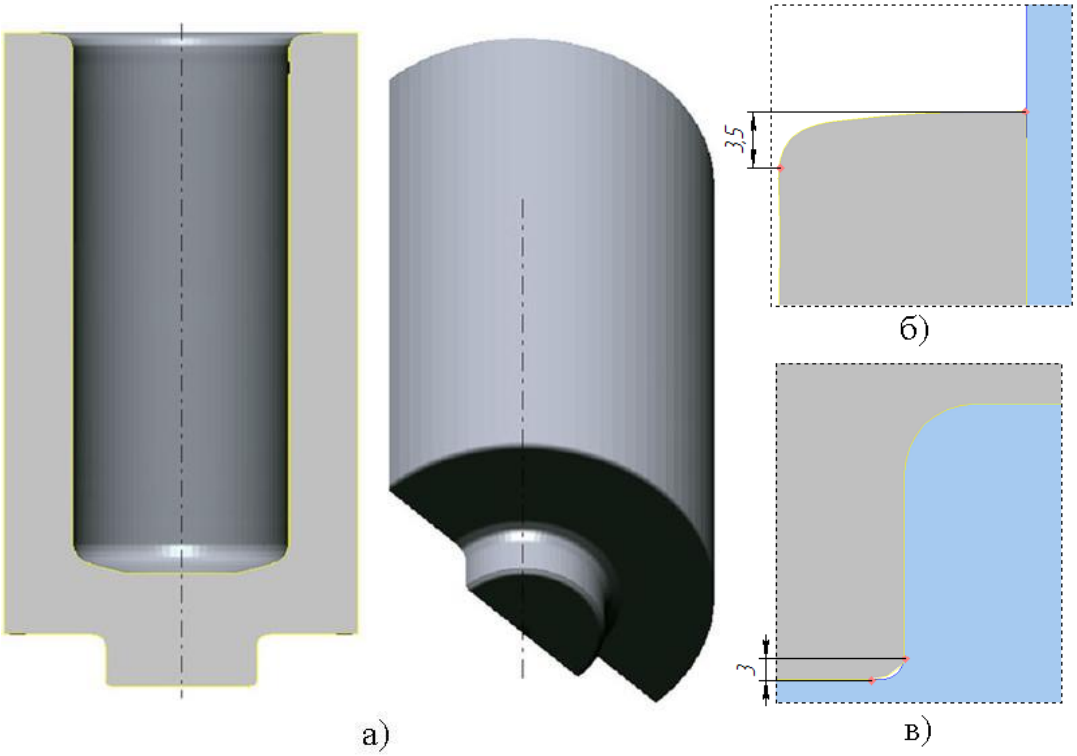


Рис.3. Внешний вид стакана с отростком (а), форма торцевой части стенки стакана (б) и степень заполнения металлом донной части матрицы (в)

На рис. 3,а представлен внешний вид полученного стакана. Верхняя кромка полученного стакана (рис. 3,в) непрямолинейна. Высота кривизны этой части стакана составляет 3,5мм. Поэтому припуск на высоту горячей поковки должен быть увеличен на эту величину, что несколько увеличит необходимый объем заготовки для получения штамповки с размерами заданными чертежом.

Можно видеть, что при заданном радиусе скругления r=1мм донной части матрицы с вертикальной её стенкой имеет место незначительное незаполнение угла полости (рис. 3,б). Следовательно, для создания более благоприятных условий течения металла в этой области матрицы необходимо увеличить радиус или стенку полости матрицы выполнить с небольшой конусностью.

По результатам работы можно сделать следующие выводы.

Программный комплекс QForm позволяет получать полную информацию о величине и характере изменения силовых параметров по ходу рассматриваемого процесса формоизменения во взаимосвязи с течением металла заготовки во время её виртуального деформирования и его напряженном состоянии уже на этапе проектирования технологического процесса комбинированного выдавливания. Полученная информация дает возможность детально анализировать эти параметры и корректировать их и соответствующую штамповую оснастку на этапе разработки технологии, что позволит сократить время на запуск в производство новых изделий.

Литература

1. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х. - М.: Машиностроение, 1987 – т. 3. Холодная объемная штамповка / Под ред. Г.Н. Навроцкого, 1987. – 387 с.
2. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х. т. - М.: Машиностроение, 1986 – т. 2. Горячая штамповка / Под ред. Е.И. Семенова. 1986. – 593 с.
3. Оптимизация технологических процессов и конструкции штампов для холодного и полугорячего выдавливания. Методические рекомендации / НПО ВИСП, ХПИ им. В.И. Ленина. - М.: ВНИИТЭМР, 1989. – 192 с.

4. Ковка и штамповка цветных металлов. Справочник. Коллектив авторов. - М.: Машиностроение, 1971. – 232 с.
5. *Сторожев М.В.* Технология ковки и горячей штамповки цветных металлов и сплавов / М.В. Сторожев, П.И. Середин, С.Б. Кирсанова. - М.: Высшая школа, 1967. – 351 с.
6. *Стебунов С.А.* QForm – программа, созданная для технологов / С.А. Стебунов, Н.В. Биба // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. - 2004. - №9. - С. 38-41.
7. *Мороз Б.С.* Сопоставление разновидностей выдавливания полых изделий с полезным использованием сил трения / Б.С. Мороз, Ю.П. Рязанцев // Обработка металлов давлением. Сб. статей. Вып. 3. РИСХМ. - Ростов н/Д. 1975. – С. 71-78.

УДК620.17

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРА УПРОЧНЕНИЯ МАТЕРИАЛА С УЧЁТОМ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ

Дмитрий Олегович Киселев,
магистр 1 года,
кафедра «Машины и технологии обработки металлов давлением»,
Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)

Научный руководитель: С.А. Типалин
кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и технологии обработки металлов давлением»

Аннотация. Рассматривается деформация материала в условиях изменения и постоянства скорости деформации. Приведены примеры построения кривой упрочнения материала в условиях изменения скорости деформирования заготовки.

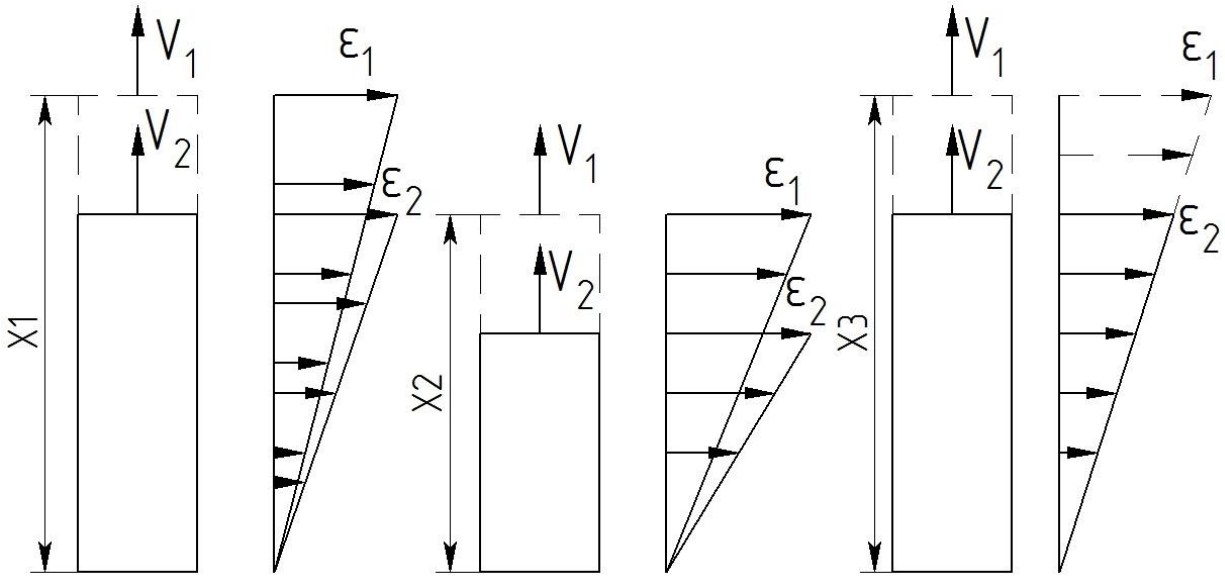
Ключевые слова. Кривая упрочнения, скорость деформации, скорость деформирования, поверхность упрочнения, свойства металла.

Актуальность. Определение изменения свойств материала в процессе деформации является одной из актуальных задач обработки металлов давлением. Действительно, претерпевая изменения в процессе пластической штамповки и накапливая деформацию материал упрочняется. Одним из самых распространенных способов, которые используются для инженерных расчетов, является прогнозирование изменения силы штамповки, используя график кривой упрочнения. Кривая упрочнения характеризуется изменением интенсивности напряжений, возникающих в материале от интенсивности деформации. Однако, общеизвестно, что на изменения свойства материала в процессе обработки давлением влияют многие факторы. Одним из которых является изменение скорости деформации [1, 2, 6, 7]. Данный параметр является одним из основных при горячей деформации, так как упрочнение, в этом случае, зависит от интенсивности скорости деформации. При холодной штамповке изменение интенсивности напряжений менее чувствительно к скорости деформации, однако, этот показатель может также влиять как на упрочнение материала, так и на предельную деформацию заготовки.

Кроме этого, необходимо учитывать, что заготовка, подвергаемая пластической деформации, деформируется неравномерно. В процессе пластического преобразования возникают области с незначительной скоростью деформации, а в некоторых участках скорость деформации может отличаться от минимальной в несколько раз. Так же необходимо учитывать и особенность оборудования, на котором происходит деформирование заготовки [3]. Большинство оборудования не в состоянии обеспечить постоянную скорость деформации. Отдельные виды прессов (в основном гидравлические) обеспечивают постоянную скорость деформации. Однако, в этом случае, скорость

деформирования участков заготовки будет различной (рисунок 1). Если же рассматривать движение ползуна у кривошипных прессов, то скорость деформирования заготовки будет постоянно изменяться в зависимости от кинематических особенностей выбранного механизма.

В зависимости от скорости деформации, свойства металла начинают изменяться. Особенно это заметно при горячей штамповке, но и при холодной штамповке так же возникают различия. Для детального изучения был проведен опыт, полностью подтверждающий предположения о зависимости свойств металла от скорости деформации при холодной штамповке [4, 5]. В процессе штамповки металла целесообразно иметь кривые упрочнения для различных скоростей деформации. Большинство машин имеют постоянную скорость деформирования, либо изменение этих скоростей может быть ступенчатым.



а) б) в)

Рисунок 1 – Влияние скорости деформирования на деформацию.
Изменение скорости деформации (а) длинного и короткого (б) образцов при одной скорости деформирования и образца (в) с постоянной скоростью деформации

В зависимости от размеров образца различия этих скоростей может быть существенна. Для устранения данной ошибки необходимо строить поверхность изменения интенсивности напряжения от скорости деформации и накопленной деформации.

Для выявления влияния скорости деформации на характер кривых упрочнения были проведены опыты на растяжение образцов [4]. Опыт был проведен на электромеханической испытательной машине Zwick/Roell Z-100 (Germany). Выбор данный машины обусловлен тем, что в ходе проведения эксперимента возможно графическое выведение данных на монитор ЭВМ с помощью вспомогательной программы «Test Xpert». В данной машине скорость передвижения подвижной траверсы может регулироваться при помощи блока управления в диапазоне 0,0005 – 200 мм/мин. Нагрузка, испытываемая образцом, преобразуется тензорезисторным датчиком силы, который расположен на траверсе, в электрический сигнал, который обрабатывается в электронном блоке и отображается в единицах силы на мониторе ЭВМ. Перемещение подвижной траверсы фиксируется индикатором перемещения, сигнал которого после обработки так же выводится на монитор ЭВМ. Измерение деформации на базе образца происходит с помощью оптического и индуктивного датчиков продольной деформации, входящих в комплектацию машины.

В качестве образцов использовались полосы холоднокатаной стали 08кп толщиной 1 мм и шириной 20 мм. Образцы зажимались своими концами в клиновых захватах подвижной и неподвижной траверс. Расстояние между захватами устанавливалось 200 мм и являлось постоянным для всей серии проведения исследования. Точность повторного позиционирования составляла 1 мкм. В ходе экспериментов фиксировались изменение длины образца и сила
деформирования. Величина перемещения и сила растяжения фиксировались датчиками. Для исследования влияния скорости деформации на характер деформирования растягиваемых образцов подвижному захвату придавалась различная скорость перемещения. Точность установок скорости перемещения траверсы составляет 0,003%. Испытания образцов проводились для скоростей перемещения траверсы 1, 10, 100, 200 мм/мин. Построенные по результатам испытаний кривые упрочнения показаны на рисунке 2.

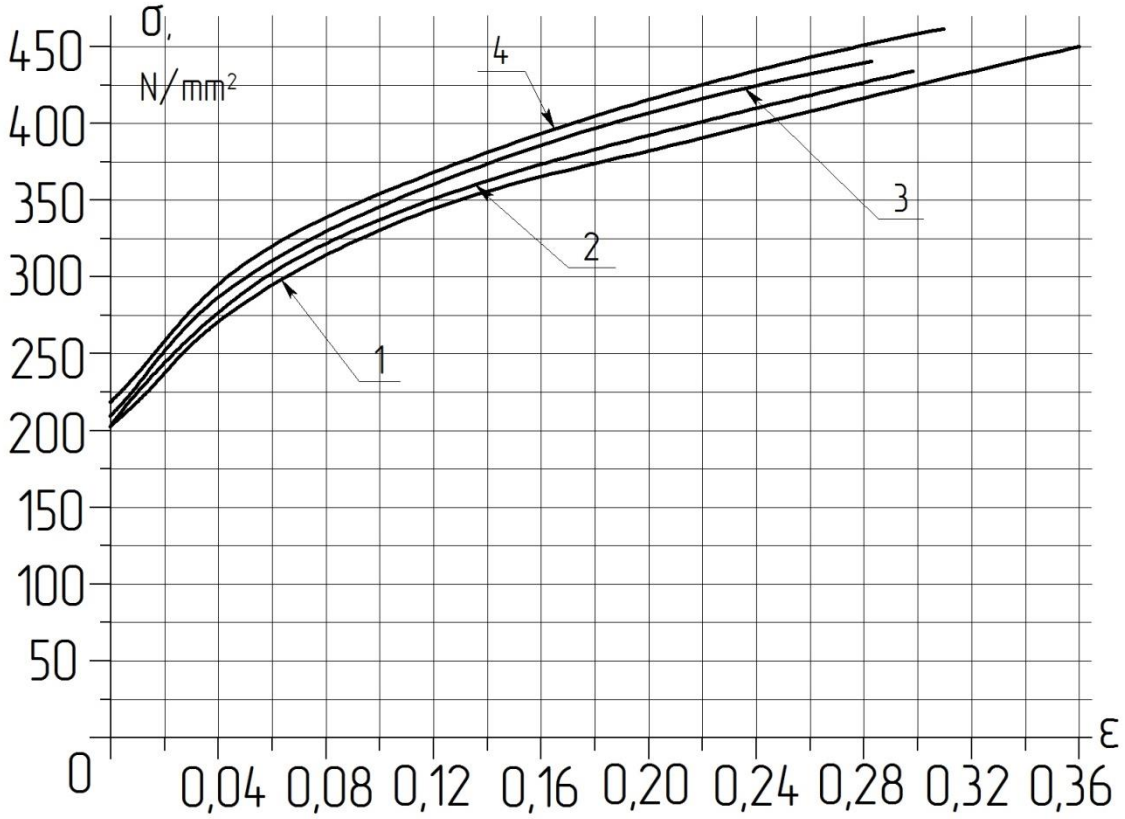


Рисунок 2 - Влияние скорости деформирования на изменение зависимости напряжения от деформации [4]. 1 – скорость деформирования 1 мм/мин; 2 – скорость деформирования 10 мм/мин; 3 – скорость деформирования 100 мм/мин; 4 – скорость деформирования 200 мм/мин.

Из рисунка 2 следует, что разные скорости испытаний дают разные экспериментальные кривые упрочнения.

Так как скорости деформации вначале и в конце процесса изменяются, то производим сечение полученной поверхности плоскостью. Построение данной плоскости производится с помощью метода подобия треугольников. Из рисунка 1 следует, что зная $\acute{\varepsilon}_{1,}$ X_1 и X_2 находим $\acute{\varepsilon}_2$ по зависимости: $\acute{\varepsilon}_2 = \acute{\varepsilon}_1 * \frac{X_2}{X_1}$. Найдя значение $\acute{\varepsilon}_{2,}$ строим плоскость, перпендикулярную плоскости $\varepsilon\acute{\varepsilon}$ и пересекающую построенную поверхность. Кривая пересечения поверхности упрочнения с построенной плоскостью является графиком кривой упрочнения при постоянной скорости деформации всех точек в условиях сжатия или растяжения образца.

Аналогично можно найти приращение для скорости деформации (рисунок 3).

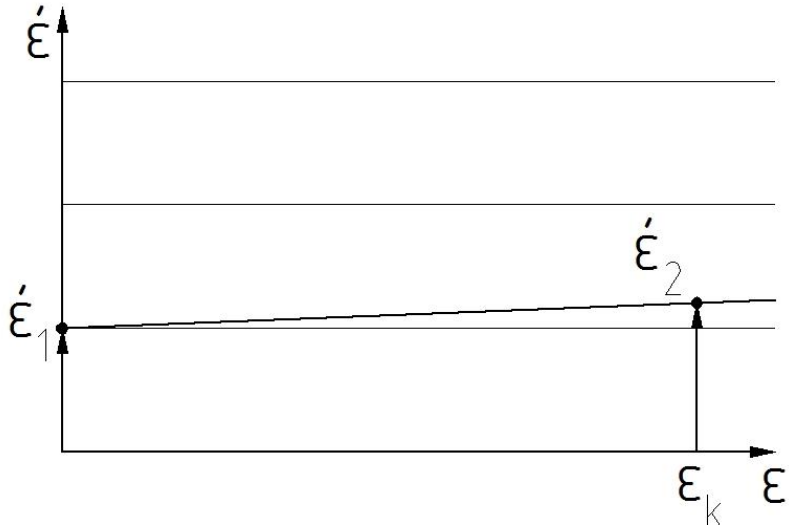


Рисунок 3 – Построение линии $\dot{\varepsilon}_1 \dot{\varepsilon}_2$, определяющую положение плоскости при постоянной скорости деформирования материальных точек образца.

В процессе деформации скорость деформирования может существенно меняться.

На практике при штамповке на кривошипных прессах скорость деформирования изменяется в процессе штамповки не по линейному закону. В этом случае необходимо построить поверхность перпендикулярно пересекающую плоскость $\varepsilon\dot{\varepsilon}$ по траектории $\varepsilon = f(\dot{\varepsilon})$

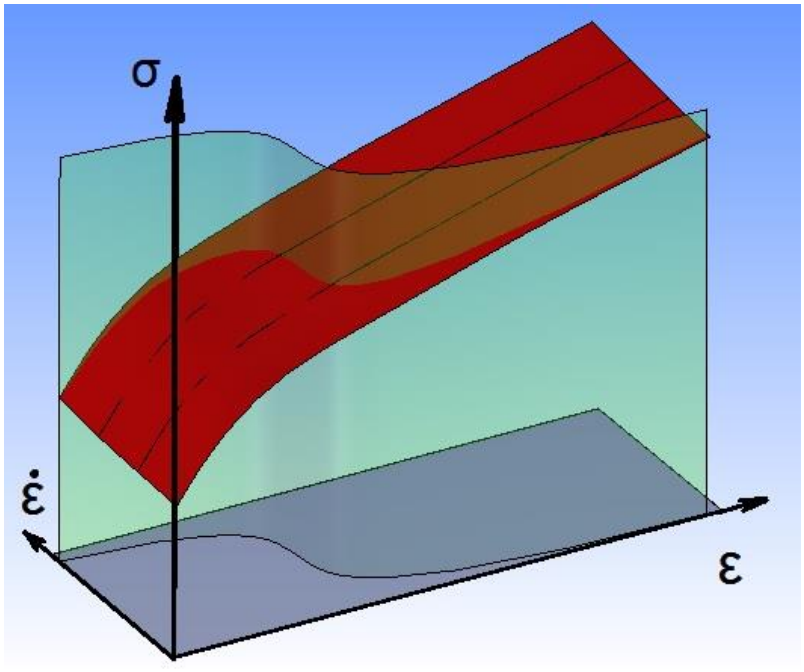
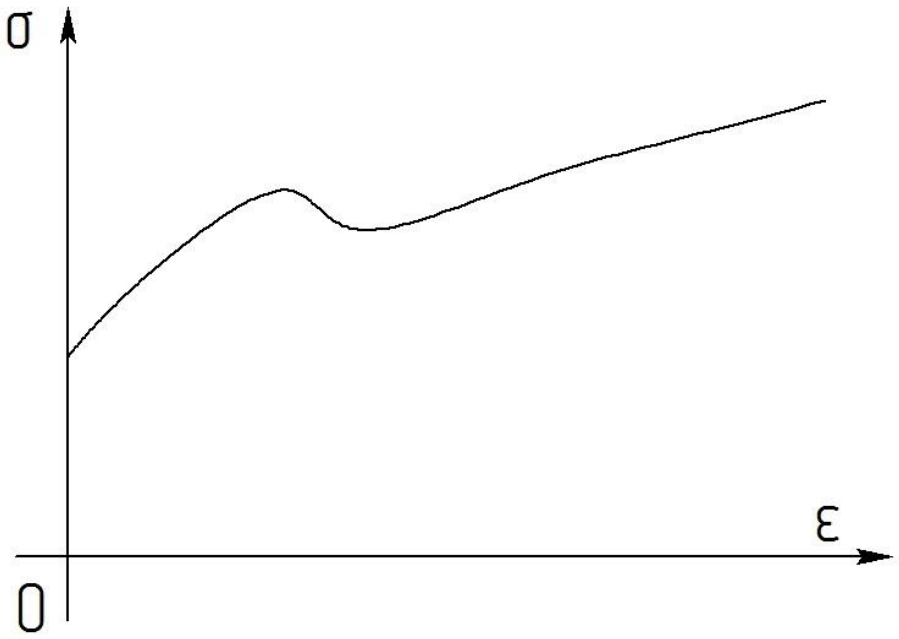


Рисунок 4 – Поверхность упрочнения материала.

Проекция пересечения данных поверхностей на плоскость $\sigma\varepsilon$ будет являться кривой упрочнения материала при данном изменении скорости деформации (рисунок 5).



(Рисунок 5 – Кривая упрочнения материала для приведенного графика скорости деформации.)

Вывод. Для определения характера упрочнения материала необходимо учитывать поверхность упрочнения характеризующейся зависимостью интенсивности напряжений от интенсивности скорости деформации и деформации. Зная график изменения скорости деформации от деформации можно построить кривую упрочнения с учетом вышеназванных параметров.

Литература

1. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением – 4-е изд., М.: Машиностроение,1977.
2. Зубцов М.Е. Листовая штамповка: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Машины и технология обработки металлов давлением».-3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Мамшиностроение. Ленингр. отд-е, 1980.
3. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3 т. 8 изд., перераб. и доп. Под ред. И.Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2001.
4. Типалин С.А., Шпунькин Н.Ф., Никитин М.Ю., Типалина А.В. Экспериментальное исследование механических свойств демпфирующего материала / Известия МГТУ «МАМИ» 2010. №1. С. 166-170.
5. Шпунькин Н.Ф., Типалин С.А. Никитин М.Ю., Типалина А.В. Экспериментальное исследования влияния анизотропии и скорости деформирования на силовые параметры при растяжении листа / Материалы 65-ой Международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ) "Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров" Международного научного симпозиума «Автотракторостроение – 2009». Книга 6, Москва, МГТУ «МАМИ», 2009 г. С.99-105.
6. Типалин С.А., Симонян В.Б. Изгиб многослойного материала / Известия ТулГУ. // Серия. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. – Тула: ТулГУ, вып.1, 2005. С.149-154.
7. Типалин С.А. Шпунькин Н.Ф., Никитин М.Ю., Сапрыкин Б.Ю. Исследование влияния скорости деформирования на силовые параметры изгиба / Материалы 65-ой Международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных

инженеров (ААИ) "Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров" Международного научного симпозиума «Автотракторостроение – 2009». Книга 6, Москва, МГТУ «МАМИ», 2009 г. С. 83-90

Секция VIII

Материаловедение в машиностроении

Председатель: **Плохих Андрей Иванович**
заместитель заведующего кафедрой МТ-8, кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение» (МТ-8)

Ученый секретарь: **Шевченко Светлана Юрьевна**
кандидат технических наук, доцент кафедры МТ-8

УДК 621.789

ПОВЫШЕНИЕ ТВЁРДОСТИ И КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПРИ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ИМПУЛЬСАМИ ПЛАЗМЫ

Анна Алексеевна Буякина,
студент 5 курса,
кафедра «Материаловедение»
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Научные руководители: С. Ю. Шевченко[(1)],К. О. Базалеева[(2)] ,
[(1)], кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение»
[(2)] кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Материаловедение»

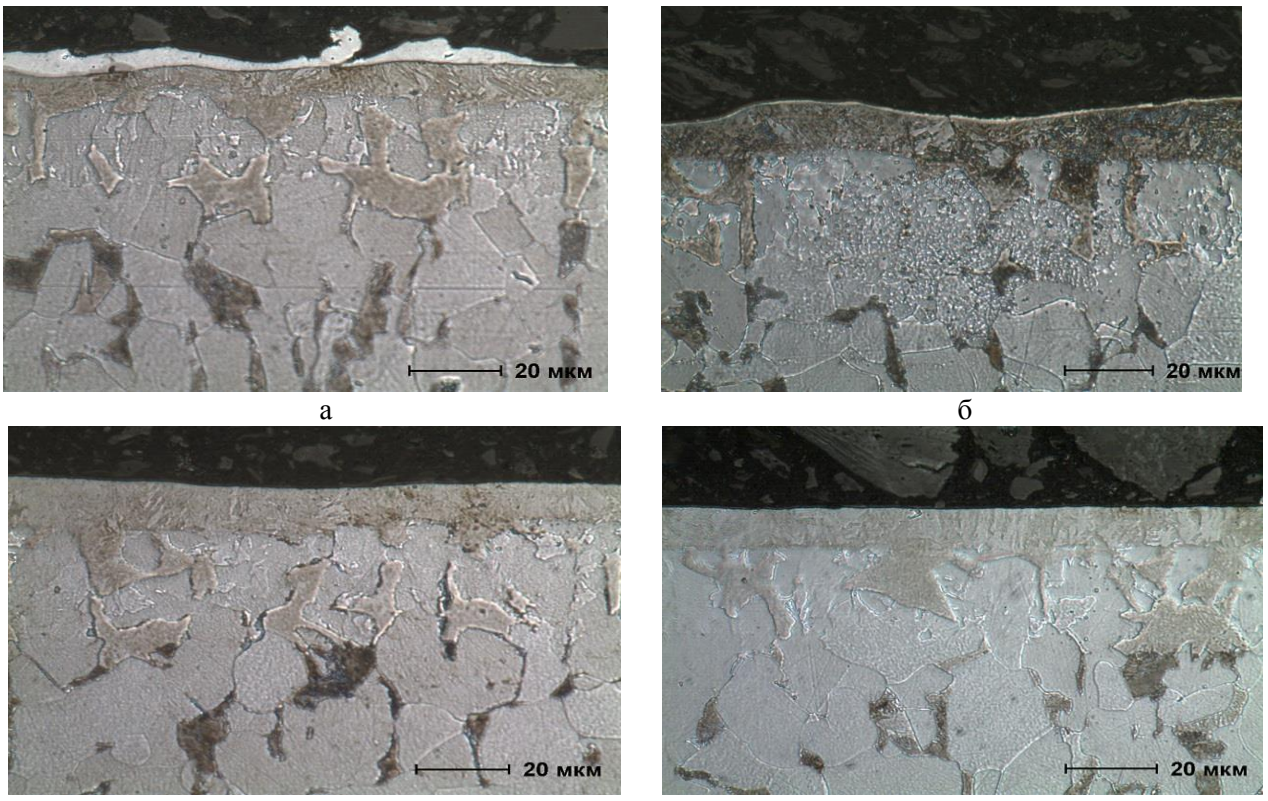
Известно, что кратковременное воздействие на металлы и сплавы высоких температур и больших давлений и последующее быстрое охлаждение приводят к значительным изменениям структуры и свойств поверхностного слоя. Такого рода воздействие реализуется при обработке плазмой взрыва. При данном виде обработки температура достигает 15000 К при времени воздействия одного импульса порядка 100 мкс, давление Р=100…500 атм., примерная скорость охлаждения $V_{охл}=10^6…10^7$ °/с. Процессы, проходящие на поверхности, слабо контролируемы, толщина модифицированного слоя достигает 50 мкм.

В данной работе рассматривалось влияние материала электрода плазмотрона на изменения структуры и свойств железоуглеродистых сплавов. Объектом исследования являлась Ст 3.

Были выбраны четыре электрода – вольфрамовый, стальной, латунный и алюминиевый. Режим обработки на протяжении всего эксперимента не менялся.

На рисунке 1 (а-г) представлены структуры поперечных срезов образцов Ст 3 после обработки плазмой взрыва с использованием различных электродов. Микроструктура исследовалась на оптическом микроскопе Olympus GX51 после травления образцов 3%-ным раствором азотной кислоты.

Модифицированный в результате плазменной обработки с использованием алюминиевого электрода слой имеет общую толщину порядка 30 мкм (рис. 1 а). При этом в измененном слое по глубине можно выделить несколько зон. Первая зона, имеющая максимальную протяженность, также как и исходная сталь представляет собой чередование светлых и темных областей: в исходном состоянии это были феррит и перлит. Однако темные участки перлита поменяли свою травимость (на фотографии коричневые области). Следует отметить, что по ориентировке и расположению зерна этой зоны являются как бы продолжением структуры основного материала. Следующая зона толщиной примерно 10 мкм однородной травимости (на фотографии коричневый слой), и на самой поверхности однородный светлый слой примерно 5 мкм.



а б

в г

Рис. 1 Поперечное сечение образца после обработки с использованием электрода из:
а – алюминия, б – латуни, в – стали, г – вольфрама

Похожую структуру имеет образец, полученный с использованием латунного электрода (см. рис. 1 б). Можно отметить, что общая толщина измененного слоя в данном образце составляет так же около 40 мкм, и слой также делится на 3 зоны.

Иначе выглядят слои полученные с использованием вольфрамового и стального электродов (рис. 1 в-г). Их толщина несколько меньше: примерно 20-30 мкм. Зерна в поверхностной зоне сильно вытянуты вдоль поверхности образца. Данная структура напоминает волокнистую, формирующуюся в процессе холодной деформации. При этом измененный слой имеет только две зоны: с чередующимися белыми и коричневыми областями и однородную коричневую.

Появление структуры подобной той, что получается при деформации, может быть объяснено действием мощной ударной волны на поверхность сплава в процессе обработки. Наличие тонкого светлого слоя при использовании электрода из латуни и алюминия, по-видимому, связано с эрозией материала электрода; в случае вольфрамового и стального электродов эрозия не наблюдается.

Эти же образцы исследовали методом РЭМ (растровый электронный микроскоп). Большие увеличения РЭМ позволили установить, что на всех образцах поверхностный слой имеет игольчатое строение. Такое строение характерно для мартенсита. Кроме того, удалось зафиксировать в тонком поверхностном слое столбчатые кристаллы. Возможно, это дендритные кристаллы, формирующиеся на оплавляемой в процессе обработки поверхности образца (рис. 2 а-г).

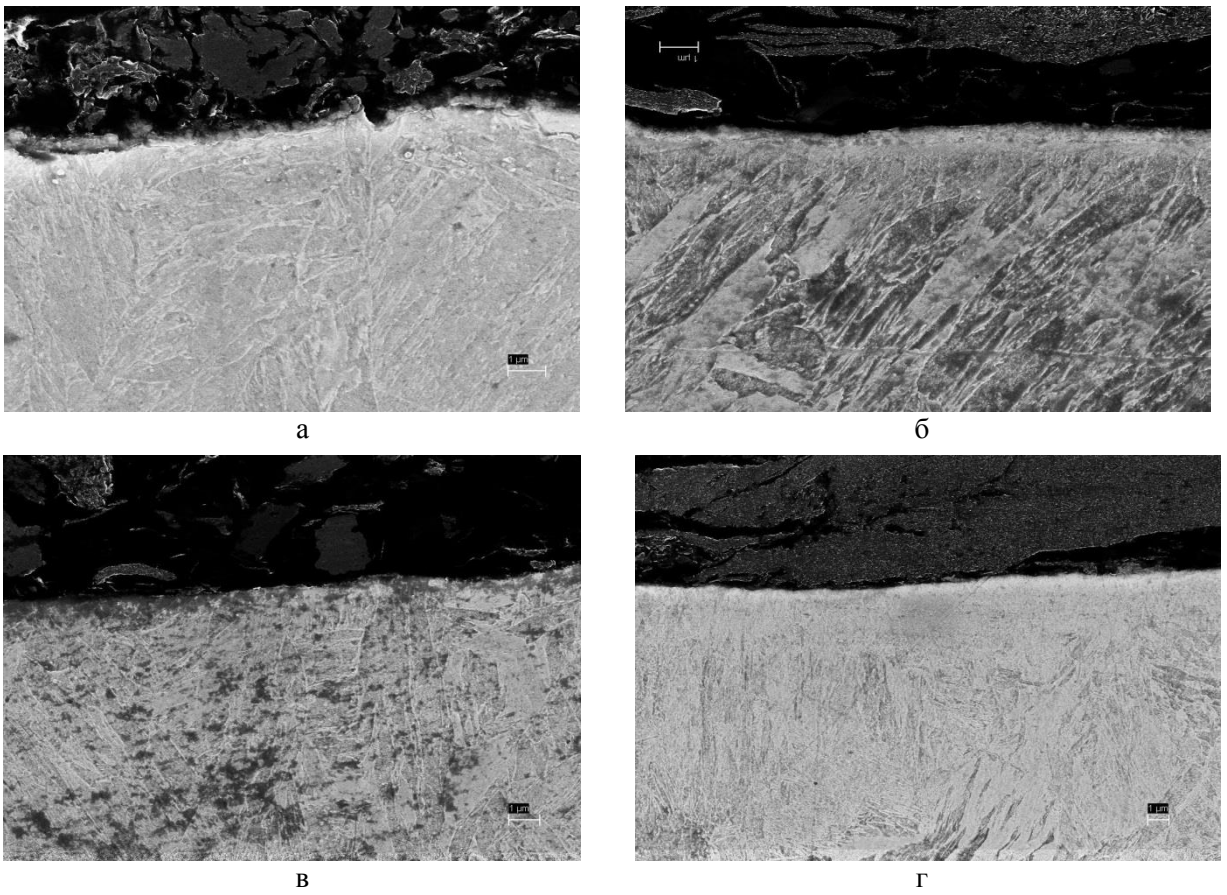


Рис.2 Поперечное сечение поверхности модифицированного образца плазмой электродом из:
а – алюминия, б – латуни, в – стали, г – вольфрама

Для определения влияния плазменной обработки на прочностные свойства поверхностного слоя были проведены измерения микротвердости. Измерения проводились на электронном микротвердомере Durascan70 по методу Виккерса с нагрузкой 25 г. Установлено, что после плазменного воздействия микротвёрдость поверхностного слоя увеличивается. Характер изменения микротвёрдости с увеличением расстояния от поверхности практически одинаковый при использовании всех четырёх электродов. Судя по значению микротвердости, предположение о мартенситном строении первой зоны модифицированного слоя справедливо. Предположительно металл в этом слое разогревался в процессе обработки выше температуры перехода в аустенитную область, а далее, благодаря высокой скорости охлаждения, в структуре сформировался мартенсит. Также следует отметить, что в Ст 3 содержание углерода очень невелико (~0.2 % С) и такое большое значение микротвердости не может быть связано исключительно с тетрагональностью мартенсита. Вероятно, здесь в упрочнении существенную роль играют дефекты кристаллического строения, возникшие в результате охлаждения сплава с очень высокими скоростями.

Значение твёрдости зависят от материала электрода. Можно увидеть, что чем выше атомный номер элемента, тем выше твёрдость. При возникновении плазмы во всех случаях использовался разряд постоянной энергии. Если атомы электрода обладают невысокой работой выхода, то сообщенная энергия распределяется по большому количеству частиц. И, наоборот, в случае высокой работы выхода в плазме присутствует относительно небольшое количество высокоэнергетичных частиц, которые могут оказывать гораздо более сильное воздействие на поверхность образца.

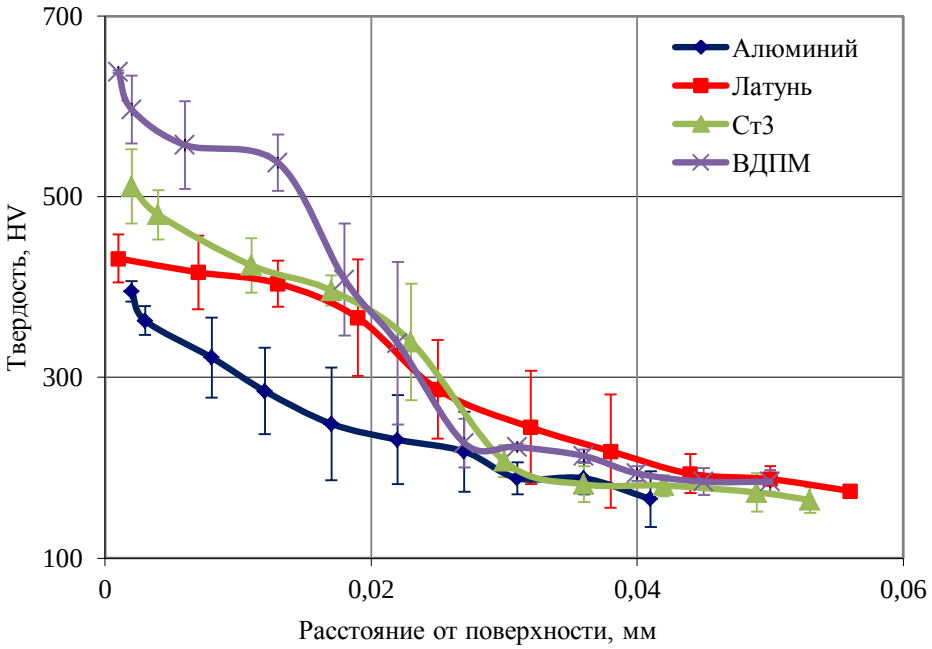


Рис. 3. Изменение микротвёрдости по глубине слоя

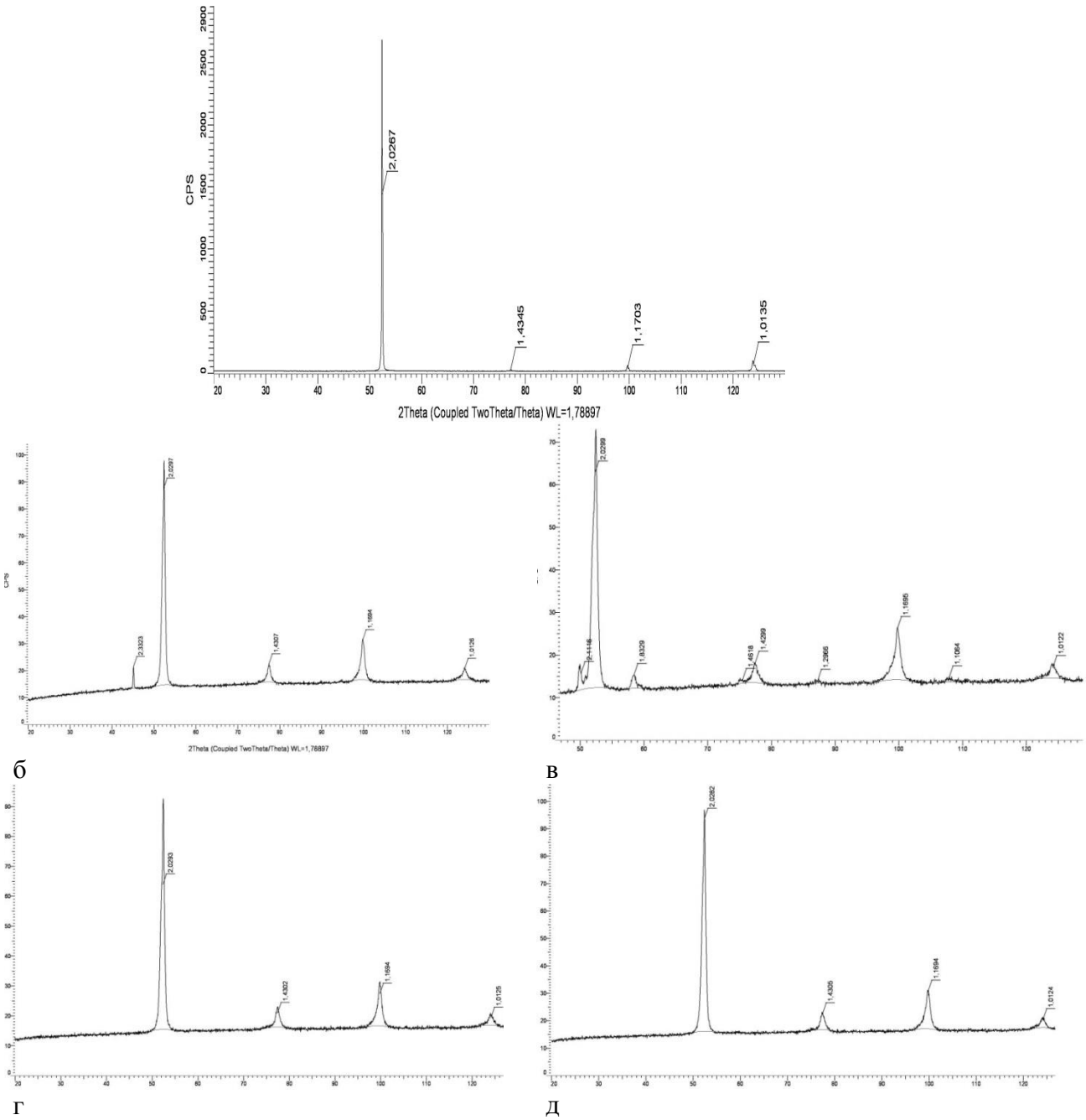
На рисунках 4 а-д представлены дифрактограммы исходного образца Ст3 без плазменной обработки, а также образцов, обработанных плазмой с использованием различных электродов. На дифрактограмме, приведенной на рисунке 4 а, зафиксированы только пики от α−твердого раствора. Фаза Fe_3C при содержании менее 10 % не дает отражений из-за низкой симметрии ее ромбической кристаллической решетки.

На дифрактограммах, полученных с образцов, подвергнутых плазменной обработке, наблюдается уширение рентгеновских пиков, что соответствует накоплению напряжений и дефектов кристаллического строения.

На дифрактограммах после обработки с электродом из алюминия и латуни (рисунки б и г, соответственно) видны пики, не относящиеся к фазе α−Fe. В случае алюминиевого электрода - это пик Al, в случае латунного электрода – это медь и цинк. Таким образом, результаты рентгеноструктурного анализа подтверждают результаты металлографического анализа: эти дополнительные отражения дают тонкие слои, состоящие из атомов электрода, сформированные в результате его эрозии.

При коррозионных испытаниях в 5%-ном водном растворе NaCl было показано, что плазменная обработка с использованием вольфрамового электрода (рис. 5 а) приводит к существенному повышению коррозионной стойкости Ст3, тогда как обработка с использованием электрода из латуни (рис. 5 б) не привела к повышению коррозионных свойств. Объектом испытания послужил сварной шов Ст3.

а



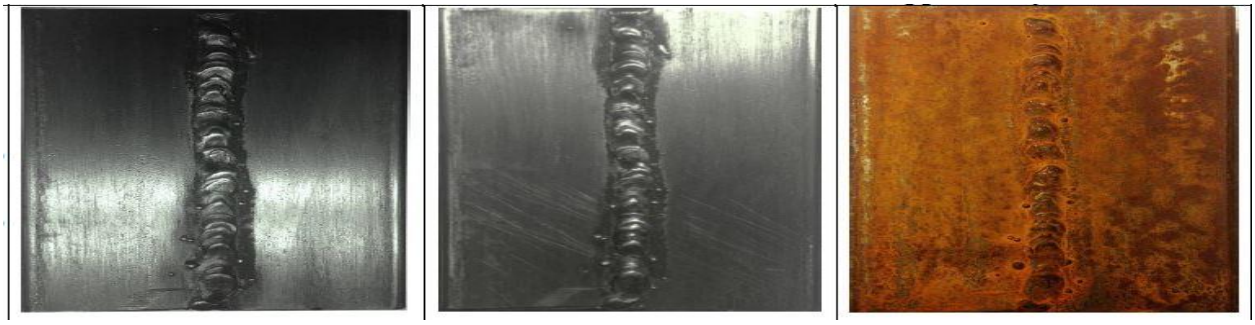
б в

г д

Рис. 4 Рентгенограмма Ст 3 : а – без обработки; после обработки с электродом из:
б – алюминия, в – вольфрама, г – латуни, д – стали



а



б

Рис. 5 Плазменная модификация сварного шва с использованием электрода из:
а – вольфрама, б – латуни

Выводы

Показано, что при воздействии плазмы взрыва на Ст3 возникает модифицированный поверхностный слой толщиной в десятки микрометров. Структура модифицированного слоя включает в себя зону мартенситного и мартенсито-ферритного строения. После воздействия плазмой зафиксировано повышение микротвердости поверхности, а также увеличение его коррозионной стойкости. Причем микротвердость модифицированного слоя зависит от используемого электрода и повышается с ростом работы выхода атомов с поверхности электрода. Значение микротвердости слоя, обработанного с использованием вольфрамового катода, примерно в полтора раза превышает микротвердость Ст3 после обычной закалки.

УДК 62-65:62-69

ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ЭКРАНА ДЛЯ ЗЕРКАЛ ТЕЛЕСКОПА КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ.

Виктория Денисовна Демина,
студентка 5 курса,
кафедра «Материаловедение в машиностроении»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научные руководители: Баженова Ольга Петровна,
ФГУП «НПО имени С.А. Лавочкина»;
Крапошин Валентин Сидорович,
доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение в машиностроении»,
Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана

Многие годы астрономы мечтали о том, чтобы поместить в космосе мощный телескоп. Ведь из космоса, где нет воздуха и пыли, звезды будут видны особенно отчетливо. В 1990 г. их мечта сбылась: шаттл вывел на орбиту телескоп им. Хаббла. Не обошлось и без огорчений: вскоре выяснилось, что главное зеркало телескопа имеет дефект. Но в 1993 г. астронавты, добавив дополнительные линзы, исправили телескоп. С тех пор с его помощью на Земле было получено множество уникальных снимков небесных тел – планет, туманностей, квазаров, которые способствовали ряду открытий, пополнивших наши знания о Вселенной. С помощью космического телескопа им. Хаббла сделаны фотоснимки галактик, отдаленных от нас на 11 миллиардов световых лет.

Космический телескоп им. Хаббла планируется снять с орбиты в 2014 году. На замену ему на исследование Вселенной в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне (110 - 320

нм), недоступном для наблюдений с помощью наземных инструментов, будет направлен международный проект «Спектр-УФ» («Всемирная космическая обсерватория - ультрафиолет», ВКО-УФ). По возможностям проект ВКО-УФ аналогичен, а по некоторым характеристикам превосходит космический телескоп им. Хаббла.

В состав космического аппарата входит телескоп Т-170М - разрабатываемый крупный автоматический космический телескоп, который станет основным рабочим инструментом ВКО-УФ для работы в ультрафиолетовом участке электромагнитного спектра. Телескоп будет оснащён главным зеркалом диаметром 1,7 м, спектрографами высокого и низкого разрешения и камерами для построения высококачественных изображений в УФ и видимом диапазоне.

Как и в любой оптической системе, для её стабильной работы необходимо постоянство геометрических размеров каждого элемента. Поэтому зеркало для телескопа было решено изготовить из материала ситалл СО115 - стеклокристаллического материала со сверхнизким коэффициентом теплового расширения. Это идеальный материал для астрономических зеркал и других оптических деталей, в которых отсутствие изменений линейных размеров и формы поверхности при значительных изменениях температуры имеет важное значение. ТКЛР ситалла СО115 от -60 до +60°С равен $(0\pm1,5)\cdot10^{-7}$ $°C^{-1}$. Для еще большей стабильности температура зеркала будет поддерживаться постоянной с помощью нагревателя, расположенного под ним.

Главная задача, поставленная перед разработчиками,- и подбор материалов для изготовления нагревателя. Ведь нагревателю предстоит работать в вакууме, да еще непосредственно рядом с зеркалом, следовательно, материалы должны иметь минимальное газовыделение, иначе работа зеркала, а также всей оптической системы будет невозможна.

В процессе теоретической проработки появилась идея конструкции нагревателя на металлической подложке из алюминиевого сплава, обладающего высокой теплопроводностью для равномерного распределения температурного поля, с последовательно нанесенными методами вакуумного напыления тонкопленочными слоями диэлектрика, токопроводящего слоя и окончательного диэлектрического слоя.

Материалы, которые будут использоваться в работе, относятся к так называемым электротехническим материалам, основными характеристиками изучения которых являются электрические свойства твердых тел. По назначению такие материалы можно разделить на следующие группы:

а) проводники. Эти материалы служат для передачи электричества из одной области пространства в другую. Им должна быть присуща высокая проводимость. Указанному требованию соответствуют металлы и их сплавы, которые подразделяются на материалы с малым удельным сопротивлением и материалы с большим удельным сопротивлением. Для производства всевозможных нагревательных элементов используются, как правило, материалы с большим удельным сопротивлением.

б) полупроводники. Материалы, необходимые в производстве средств связи и автоматического регулирования.

в) изоляторы. В противоположность проводникам изоляторы используют для того, чтобы воспрепятствовать перемещению электричества из одной области пространства в другую. Изоляторы должны иметь весьма низкую проводимость или совсем не проводить электричества. Поэтому сопротивление изоляторов должно быть как можно большим. Эти вещества характеризуются сильной ковалентной или ионной связью, такой же, как многие керамики, стекла и полимеры. Один из видов изоляторов, известных под названием «диэлектрики», вследствие высокой поляризуемости способен усиливать электрические поля. Электрическое поле может несколько смещать электроны относительно положительно заряженных ионов, что приводит к образованию диполей. Переменный ток смещения может постоянно протекать по материалу, который является изолятором для постоянного тока.

Классифицировать данные материалы можно с точки зрения величины электрических сопротивлений. Соответствующие данные для некоторых твердых тел представлены в табл. 1.

Таблица 1. Электрические сопротивления некоторых твердых веществ при 20^{o} С.

Металл	Удельное электрическое сопротивление 10^{-8} Ом·м	Полупро-водник	Удельное электрическое сопротивление Ом·м	Изолятор	Удельное электрическое сопротивление Ом·м
Серебро	1,6	Германий	0,47	Al_2O_3	10^{13}
Медь	1,7	Кремний	$5 \cdot 10^{3}$	Слюда	$9 \cdot 10^{14}$
Алюми-ний	2,8			Алмаз	10^{14}
Свинец	20			Стекла разных сортов	10^{9} - 10^{15}
Никель	7,3				
Олово	12				
Цинк	5,9				

Сопротивление металла увеличивается с ростом температуры вследствие термического рассеяния электронов. Сопротивление полупроводников и изоляторов снижается при повышении температуры в большей части всего температурного интервала.

Твердыми проводниками электрического тока, необходимыми в данном случае, могут являться металлы и их сплавы. Среди металлических проводниковых материалов имеются материалы, обладающие высокой проводимостью, и материалы, обладающие высоким сопротивлением. Металлы с высокой проводимостью используют для изготовления проводов, кабелей, обмоток трансформаторов, волноводов и т.д. Металлы и сплавы с высоким сопротивлением применяют в электронагревательных приборах, лампах накаливания, реостатах, резисторах и т.п.

Величина, с помощью которой количественно оценивается электрическое сопротивление материала, называется удельным электрическим сопротивлением - ρ. Эта величина определяется из формулы (1).

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \qquad (1)$$

где R - общее сопротивление проводника длиной l, м

S - поперечное сечение проводника, постоянное по всей его длине, $мм^2$,

ρ - удельное электрическое сопротивление проводника.

Общее электрическое сопротивление проводника R находят непосредственным измерение, а по формуле (2) вычисляют величину удельного сопротивления проводника.

$$\rho = R \cdot \frac{S}{l} \qquad (2)$$

Удельное сопротивление в данном случае выражается в Ом·$мм^2$/м. Если единицей измерения длины взять сантиметр, а площади - квадратный сантиметр, то получим более привычную единицу измерения удельного сопротивления проводника в более крупных единицах - Ом·см (омсантиметрах): 1Ом·см = 10000 Ом·$мм^2$/м. В системе СИ единицей

удельного сопротивления является Ом·м (1 Ом·м = 10^6 Ом·мм^2/м). Дольная от системной единицы 1 мкОм·м = 1 Ом·мм^2/м . Удельное электрическое сопротивление ρ - основная электрическая характеристика, так как она позволяет оценить сопротивление, оказываемое материалом при протекании через него электрического тока. Чем меньше ρ, тем в большей степени материал проводит электрический ток. Так, у проводниковой меди ρ = 0,0175 ÷ 0,0182 Ом·мм^2/м, у проводникового алюминия ρ = 0,0279 ÷ 0,0283 Ом·мм^2/м. Эти значения удельного электрического сопротивления показывают, что медь лучше проводит ток по сравнению с алюминием.

Свойство различных металлов, в том числе и проводниковых, проводить электрический ток часто оценивается еще величиной удельной проводимости γ. Это величина обратна удельному электрическому сопротивлению, вычисляемая по формуле (3).

$$\gamma = \frac{l}{\rho} \qquad (3)$$

Удельная проводимость измеряется в Ом$^{-1}$ · см$^{-1}$ или (у проводниковых материалов) в м/Ом мм^2 . Она непосредственно указывает, в какой мере тот или иной материал проводит ток. Так у серебра удельная проводимость γ = 65,8 м/Ом мм^2 , а у меди γ = 57 м/Ом мм^2 , т.е. серебро лучше проводит электрический ток, так как его удельная проводимость больше, чем у меди.

Температурный коэффициент линейного расширения металлических проводников интересен в данной работе с точки зрения сопряженной работы различных материалов в конструкции нагревателя.

В качестве электропроводящих материалов, когда необходима высокая электропроводность, как, например, в кабелях, шинах, электрических цепях и т.п., то обычно используют чистую медь. Серебро, характеризуемое несколько большей проводимостью, как правило, не применяют вследствие высокой его цены. Алюминий, электропроводность которого вдвое ниже чем у меди, используют при больших габаритах проводников. Для ряда практических применений, например в резисторах для рассеяния энергии или в нагревательных элементах, желательны сплавы металлов с высоким электрическим сопротивлением. Такие свойства достигаются в сплавах переходных металлов. Нагревательные элементы часто изготавливают из материалов, подобных нихрому (сплав никеля и хрома) с высоким электросопротивлением и стойкостью против окисления при высоких температурах. Этот материал широко применяется в производстве тонкопленочных оптических покрытий и рекомендован для этих целей. Нихром – сплав с низким температурным коэффициентом линейного расширения. Имеет хорошую адгезию к окислам металлов, а его удельное электрическое сопротивление - $1{,}12 \cdot 10^{-3}$ Ом·см. Температурный коэффициент электрического сопротивления, $1{,}10 \cdot 10^{-5}$ 1/°С.

Важнейшие усредненные физические характеристики металлов (при 20° С), применяемых в качестве проводниковых материалов в областях электротехники и радиоэлектроники, приведены в табл.2.

Таблица 2. Физические характеристики металлов при 20° С.

Металл	Плотность 10^{-3} кг/м^3	Удельная теплопроводность дж/(кг·град)	Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha_l \cdot 10^6$ град $^{-1}$	Удельное электро-сопротивление 10^{-8} Ом·м	Температурный коэффициент удельного сопротивления, град $^{-1}$
Медь	8,9	390	16,5	1,72	0,0043
Алюминий	2,7	209	24	2,8	0,0042

Тантал	16,6	54	6,5	13,5	0,0038
Титан	4,5	15	8,1	42	0,0044
Цирконий	6,5	17	5,4	41	0,0045
Рений	21	71	4,7	21	0,0032
Золото	19,3	293	14,2	2,4	0,0038
Серебро	10,5	415	19,3	1,6	0,004
Палладий	12	72	11,9	11	0,0038
Железо	7,8	73	11	9,8	0,006
Никель	8,9	95	13	7,3	0,0065
Кобальт	8,7	79	12,5	6,2	0,006
Свинец	11,4	35	29	21	0,0037
Олово	7,3	65	23	12	0,0044
Цинк	7,1	111	31	5,9	0,004
Кадмий	8,6	93	30	7,6	0,0042
Индий	7,3	25	24,8	9	0,0047
Галлий	5,9	-	18,3	56	-

Диэлектрические материалы – один из классов электротехнических материалов, т.е. материалов, обладающих определенными свойствами при их взаимодействии с электромагнитным полем. Важнейшим признаком для классификации электротехнических материалов по их электрическим свойствам является электропроводность, т.е. способность пропускать через себя постоянный ток под действием приложенного к телу постоянного (не изменяющегося во времени) электрического напряжения. Под диэлектрическими материалами понимают материалы, оказывающие весьма значительное сопротивление прохождению через них постоянного электрического тока; в этих материалах возможно существование сильных электрических полей. Таким образом, диэлектрические материалы по их основным свойствам резко отличаются от проводниковых материалов, обладающих сильно выраженной электропроводностью, в связи с чем существование сильных электрических полей в этих материалах невозможно. В простейших случаях их применения диэлектрики используются в качестве электроизоляционных материалов, из которых создается электрическая изоляция устройства. Назначение электрической изоляции сводится к тому, чтобы воспрепятствовать прохождению электрических токов путями, нежелательными для работы данной электрической схемы. Иногда диэлектрики создают среду, в которой определенным образом распространяются электромагнитные волны. Во всех этих случаях диэлектрики являются пассивными: их роль сводится лишь к созданию изоляции или среды для передачи электромагнитных колебаний, а изменяемость электрических параметров диэлектрического материала при изменениях внешних факторов и прочих не важна для действия устройства. Существует также класс активных (управляемых) диэлектриков, которые играют не только «пассивную» роль подобно обычным электроизоляционным материалам, но используется их искусственно управляемая изменяемость свойств под действием различных факторов. В данном случае мы будем рассматривать класс пассивных диэлектриков.

Изоляционные материалы должны, например, иметь низкие диэлектрические потери, высокую электрическую прочность. Материалы по возможности должны быть легкими, механически прочными, не бояться тряски, вибраций и ударных нагрузок с большими ускорениями. Они должны обеспечивать надежную эксплуатацию как при температурах 150...200^{o}C (а иногда и выше), так и при -60...-80^{o}C. Чередование многократных температурных циклов не должно вызывать их порчи.

Одним из перспективных материалов для решения данной задачи может оказаться радиотехническая керамика. Радиокерамика – наиболее высококачественная керамика, используемая в радиоаппаратуре. Она отличается длительной нагревостойкостью, влагостойкостью и химической нейтральностью, не стареет и не обнаруживает остаточных деформаций, радиационно стойка. Радиокерамика допускает прочный контакт с металлами путем пайки твердыми и мягкими припоями. Основные компоненты радиокерамики: оксиды алюминия, кремния, титана, магния, олова и др.

Разработка нового класса материалов – полупроводников и активных диэлектриков и устройств на их основе, начиная с конца 40-х – начала 50-х годов, обусловлено развитием электронной промышленности и необходимостью реализации процесса управляемого переноса носителей заряда не в вакуумных приборах (что тормозило развитие электроники из-за малого быстродействия, низкого коэффициента полезного действия и, как следствие, высокой энергоемкости и большого тепловыделения, препятствующего миниатюризации устройств), а в твердом теле. В результате был осуществлен переход от вакуумной к твердотельной полупроводниковой электронике, лишенной недостатков первой из них. Всем вышесказанным обусловлено применение данных материалов в основном в электронной промышленности на небольших габаритах исходной поверхности.

В качестве диэлектрических пленок чаще всего в полупроводниковой электронике используются оксиды, например диоксиды кремния SiO_2, алюминия Al_2O_3 и некоторых других металлов, а также нитрид и оксинитрид кремния Si_3N_4 и SiO_xN_y.

В табл. 3 приведены свойства наиболее часто используемых диэлектрических пленок.

Таблица № 3. Физико-химические свойства диэлектриков.

Диэлектрик напыленный	Удельное сопротивление Ом см	Электрическая прочность В/см	Относительная радиационная стойкость	Коэффициент термического расширения K^{-1}
SiO_2	10^{15} - 10^{16}	10^7	1	$0{,}5\cdot10^{-6}$
Si_3N_4	10^{15} - 10^{16}	10^7	10	$3\cdot10^{-6}$
Al_2O_3	10^{14} - 10^{15}	10^6	10^2	$4\cdot10^{-6}$
Гексометил-дисилоксан	$2\text{-}5\cdot10^{15}$	10^6		

По мере увеличения поля, приложенного к изолятору, протекающие по нему малые токи, которые обусловлены присутствием небольшого числа электронов в зоне проводимости, а также ионной проводимостью и эффектами смещения, будут возрастать в соответствии с законом Ома. При некоторой довольно большой величине поля закон Ома перестает соблюдаться, сила тока резко возрастает до большой величины, что свидетельствует о катастрофически быстром падении сопротивления изолятора. Этот эффект обусловлен рядом явлений, известных под общим названием пробой. Напряжение, при котором происходит пробой диэлектрика, называют пробивным напряжением, а

соответствующую напряженность поля – пробойной или электрической прочностью диэлектрика.

Существует несколько разновидностей пробоя: а) электрический, б) термический, в) электрохимический, г) пробой при разряде, д) следовой пробой. У твердых диэлектриков могут наблюдаться три основных механизма пробоя: а) электрический, б) термический, в) электрохимический. Каждый из указанных механизмов пробоя может иметь место для одного и того же материала в зависимости от характера электрического поля – постоянного или переменного, импульсного, низкой или высокой частоты; времени воздействия напряжения; наличия в диэлектрике дефектов, в частности закрытых пор; толщины материала; условий охлаждения.

Так как изолирующий материал обычно используют для того, чтобы воспрепятствовать прохождению электричества, необходимо, чтобы пробой наступал при возможно более высоких полях. Величина такого критического поля характеризует электрическую прочность изолятора. Желательно знать, как поведет себя изолятор в весьма высоких полях (пробой) и в слабых переменных полях (диэлектрические свойства). Хороший изолятор не обязательно будет хорошим диэлектриком, и наоборот.

Проведем оценку конструктивных характеристик нагревателя. Рассеивающая мощность в нагревателе опытного образца равна 5 Вт, при напряжении 27 В. Тогда ток через нагреватель, который рассчитывается по формуле (4), равен $I = 5 \div 27 = 0.185\ A$, а сопротивление, по формуле (5), равно $R = 27 \div 0.185 = 146\ Ом$.

$$I = W \div U, \tag{4}$$

$$R = U \div I, \tag{5}$$

где I – ток, проходящий через нагреватель;
R – сопротивление нагревателя;
U – напряжение.

Геометрические размеры нагревателя оценим из предположения, что опытный образец, имеющий 10·20 см, будет заполнен по площади наполовину, т.е. площадь нагревателя будет равна 100 см^2. Исходя из того, что толщина нихрома не должна превышать 1 мкм, и что удельное сопротивление пленки нихрома не превышает $2 \cdot 10^{-3}$ Ом·см, определим ширину нагревателя. Приняв длину нагревателя равной 50 см, получим, что ширина меандра определится из выражения (6):

$$a = \frac{(\rho \cdot l)}{(R \cdot h)} \tag{6}$$

где ρ – удельное сопротивление;
l – длина нагревателя;
R – сопротивление нагревателя;
h – толщина пленки нихрома.

Подставляя полученные значения определим, что ширина меандра равняется 7,5 см. Таким образом, при выбранной толщине пленки 1 мкм, соотношение длины к ширине равняется, примерно, 5 : 1.

Далее следует описания экспериментальных образцов нагревателей, приводятся измеренные значения сопротивлений нагревательных элементов , сопротивления изоляции при напряжениях 9, 100 и, в некоторых случаях, при 500 В.

Структура: подложка – АМг6, диэлектрик – глубокая анодировка подложки, токопровод – нихром.

На образцах № 6,7,8 (рис.1, 2, 3) изоляционные слои выращивались на алюминиевой подложке методом глубокой оксидировки. Размер каждого образца 60х50 мм, толщина 1,5мм. Контакты к нагревательному элементу - нихром + медь, нагревательный элемент- нихром. Контакты паянные, достаточно прочные. В образце №6 металл подложки полностью переведен в окисел алюминия, а в образцах 7 и 8 толщина изоляционного слоя не менее 200 мкм с каждой стороны . Все образцы выдерживают

пробивное напряжение 500 В, при этом сопротивление изоляции всех образцов более 1000 МОм. Сопротивление слоя нагревателя в образцах №6 - 278 Ом, №7 - 63 Ом, №8 - 66 Ом.

Структура: подложка - АМг6, диэлектрик - гексаметилдисилоксан, токопровод - нихром.

Образцы 1, 9, 10 (рис. 4, 5, 6).

Диэлектрические пленки, полученные методом вакуумной плазменной полимеризации имеют высокую электрическую прочность $E_{пр}$ $10^6 – 10^7$ В/см. Для каждого «конденсатора» существуют три пороговые значения напряжения: напряжение первого пробоя Uo, максимальное значение пробоя Umax и минимальное значение напряжения Umin, которое устанавливается на конденсаторе после пробоя.

Напряжение первого пробоя Uo линейно зависит от толщины пленки. Первый пробой происходит в условиях неоднородного поля на «остриях» электродов, частиц пыли и неоднородных включений (при изготовлении системы металл - диэлектрик - металл).

Umax не зависит от размеров электродов, его полярности и оно постоянно для нескольких сотен пробоев. Umax характеризует электрическую прочность диэлектрической пленки.

Напряжение Umin определяется постоянной времени цепи разряда конденсатора и длительностью процесса разрушения верхнего электрода.

Известно, что слои, полученные из мономера гексометилдисилоксана в высокочастотной кислородной плазме, приобретают структуру модифицированных окислов SiO_2. Эти материалы относятся к классу силиконов. Наличие кремния определяет повышенную нагревостойкость этих материалов. Высокие диэлектрические свойства кремнийорганических полимеров сохраняются при повышенных температурах. На подложку №1 из АМг6 был нанесен слой такого окисла толщиной порядка 10-13 мкм. В качестве контактных площадок использовалась структура нихром + медь, а в качестве нагревателя слой нихрома.

При контроле качества данного диэлектрика, без напыления на него металлических слоев, сопротивление изоляции было порядка 500 МОм при подаче напряжения 100 В. После напыления контактных площадок размером 20·20 мм, сопротивление изоляции стало 30 МОм, при том же напряжении.

После припайки оловянным припоем сопротивление изоляции на одном из контактов стало равно нулю, т.е. произошло разрушение изоляции. Сопротивление слоя нагревателя (нихрома) равно 140 Ом. На данном покрытии плохо держатся металлические слои.

На подложки №9 и №10 из АМг6, предварительно протравленные, были нанесены такие же слои комбинированного диэлектрического слоя электрохимического окисла + композит на основе оксида кремния и на них напылен нагреватель из нихрома. Без припайки контактов этот образец при напряжении 500 В имел сопротивление изоляции более 1000 МОм.

Структура: подложка АМг6, диэлектрик - полимеризованный кремнийорганический лак К-85,

токопровод – нихром.

Образец №2 (рис.7) имел сопротивление нагревателя 215 Ом. Без напыления контактов сопротивление изоляции составляло порядка 500 МОм при напряжении 100 В. После припайки свинцово - оловянным припоем к контактам площадкам подводящих проводов произошло разрушение лакового слоя. Адгезия металла к лаковой пленке оставляет желать лучшего.

Структура: подложка титан, диэлектрик - вакуумнонапыленные чередующиеся слои оксидов SiO_2 и CrO_2 , контактные площадки – медь + нихром.

В образце №3 (рис.8) была сделана попытка использовать в качестве диэлектрика оксиды $Si0_2$ и CrO_2. Оба эти окисла широко используются в оптической и электронной промышленности и известны как очень стойкие и прочные материалы. В качестве

подложки был использован титан, имеющий близкий к этим окислам коэффициент линейного расширения (80-95) $\cdot 10^{-7}$. Для создания слоя этих окислов толщиной в несколько микрон для исключения внутренних напряжений изолятор пылился чередованием тонких слоев (толщиной 0,1 мкм) $Si0_2$ и CrO_2. Всего было напылено 40 слоев, общей толщиной порядка 4 мкм.

В качестве контактных площадок использовалась структура: нихром + медь. Сопротивление изоляционного слоя между одной контактной площадкой и титановой пластиной было 3 кОм, для другой контактной площадки - 10 кОм. Механическая прочность припаянных проводников удовлетворительная. Сопротивление между контактными площадками по поверхности 60 кОм.

Структура: подложка (как диэлектрик) – стекло, токопровод - нихром.

При использовании диэлектрической подложки отпадает проблема создания надежного изоляционного слоя. Было изготовлено два образца № 4 (рис.9) и № 5 (рис.10). Механическая прочность паянных контактов достаточно надежная. Сопротивление слоя нагревателя образца №4 - 190 Ом, а образца № 5 -175 Ом.

Результаты испытаний электрических характеристик опытных образцов сведены в табл.4.

Таблица 4. Испытания электрических характеристик опытных образцов нагревателей.

Номер образца	Описание структуры образца	Сопротивление нагревателя	Сопротивление изоляции		Прочность изоляции
			при 100 В	при 500 В	
№ 1	Подложка-АМг6, Диэлектрик - гексаметилдисилоксан, Токопровод - нихром	149,1 Ом	-	-	Пробой при 200 ÷ 300 В
№ 9	Подложка-АМг6, Диэлектрик - гексаметилдисилоксан + композит на основе SiO_2 , Токопровод - нихром	116,9 Ом	40 ÷ 50 МОм	500 МОм	Пробой при 400 В, Ток утечки > 10 мА
№ 10	Подложка-АМг6, Диэлектрик - гексаметилдисилоксан + композит на основе SiO_2 , Токопровод - нихром	135,8 Ом	-	500 ÷ 700 МОм	Пробой при 440 В, Ток утечки > 10 мА
№ 6	Подложка – Амг6, Диэлектрик – глубокая анодировка подложки (на данном образце металл подложки переведен в окисел полностью), Токопровод - нихром	299,5 Ом	40 ÷ 50 МОм	>500 МОм	Выдержали при 500 В 1 мин (пробоя нет)
№ 7	Подложка – Амг6, Диэлектрик – глубокая анодировка подложки (не менее 200 мкм с каждой стороны), Токопровод - нихром	63 Ом	40 ÷ 50 МОм	>500 МОм	Выдержали при 500 В 1 мин (пробоя нет)

№ 8	Подложка – Амг6, Диэлектрик – глубокая анодировка подложки (не менее 200 мкм с каждой стороны), Токопровод - нихром	67,4 Ом	40 ÷ 50 МОм	>500 МОм	Выдержали при 500 В 1 мин (пробоя нет); При 1000 В выдержал 0,5 мин, далее пробой
№ 2	Подложка АМг6, Диэлектрик - полимеризованный кремнийорганический лак К-85, Токопровод - нихром	20 Ом	40 МОм	-	Выдержали при 500 В 1 мин (пробоя нет); Выдержали при 1000 В 1 мин (пробоя нет).
№ 3	Подложка титан, Диэлектрик - вакуумнонапыленные чередующиеся слои оксидов SiO_2 и CrO_2 , Контактные площадки – медь + нихром, токопровода нет	Нагревателя нет	Между одной площадкой и подложкой – 25 кОм; между второй и подложкой - 13 кОм	-	-
№ 4	Подложка (как диэлектрик) – стекло, Токопровод - нихром	198, 6 Ом	-	-	-
№ 5	Подложка (как диэлектрик) – стекло, Токопровод - нихром	181,3 Ом	-	-	-

В результате проведенных испытаний были получены следующие выводы:

Подложка из АМг6 + оксид алюминия + нихром с технологией глубокой оксидировки позволяет производить надежное контактирование и при этом не разрушается изолирующий слой. При напряжении 500 В сопротивление изоляции было более 1000 Мом

Структуры АМг6 + полимер + нихром и титан + кремнийорганический лак + нихром имеют тенденцию к разрушению изоляционного слоя при проведении пайки. Сопротивление изоляции после такой операции падает до нескольких мегаом. Причем сцепление слоя нихрома с данными полимерами гораздо хуже, чем у образцов с глубокой оксидировкой.

Структура титан + окислы кремния и циркония + нихром имели плохое сопротивление изоляции. По всей видимости, это вызвано недостаточным качеством обработки поверхности титановых пластин и малой толщиной слоя окисла (4 мкм). Паянные контакты имеют хорошую прочность.

Структура стекло + нихром имеет прочные контакты, вопросы, связанные с надежностью изоляции полностью отпадают.

В скором времени дополнительно будут проведены исследования на газовыделения.

По расчетному сопротивлению (146 Ом) больше всего подходит образец 1 со структурой металлическая подложка из АМг6 + мономер + нихром (сопротивление нагревателя 149 Ом), но эта структура имеет плохую прочность изоляции (пробой при 299-300 В). Структура образцов 7 и 8- металлическая подложка из АМг6 + оксид алюминия + нихром, наоборот, имеет недостаточное сопротивление нагревателя (63-67 Ом), но зато отличную прочность изоляции (при выдержки 500 В 1 минуту пробоя нет). Поэтому было принято решение в дальнейшем исследовать образцы со структурой металлическая подложка из АМг6 + оксид алюминия + мономер + нихром, т.е. будет произведено анодирование алюминиевой подложки (не глубокое ~ до 100 МКС) с запылением пор гексаметилдисилоксаном, а сверху будет напылен слой нихрома, верхний слой изоляции- мономер. Такая композиция должна иметь необходимое сопротивление нагревателя и высокую прочность изоляции.

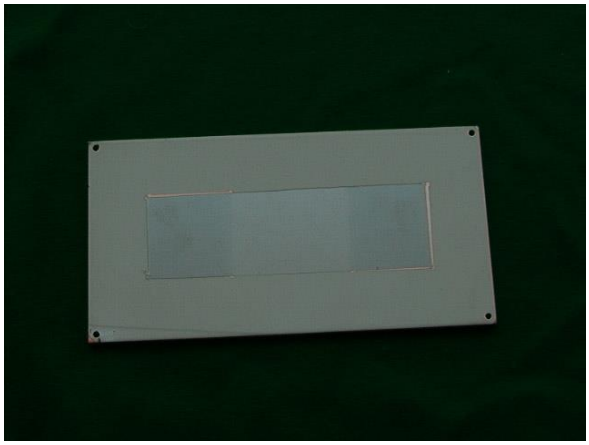


Рис.1. Образец № 6 :
Подложка – алюминиевый сплав АМг6, с верхним слоем, подвергнутым химическому травлению;
1-ый диэлектрический слой – комбинированный: электрохимический окисел гексаметилдисилоксана + композит на основе оксида кремния;
Токопроводящий слой – нихром;
Контактные площадки – медь + нихром.

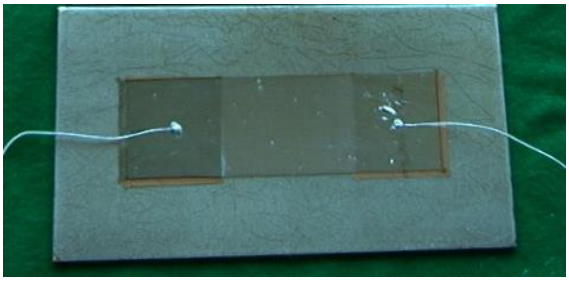


Рис.2. Образец № 7:
Подложка – алюминиевый сплав АМг6;
Диэлектрический слой – полимеризованный кремнийорганический лак К-85,;
Токопроводящий слой – нихром;
Контактные площадки – медь + нихром.

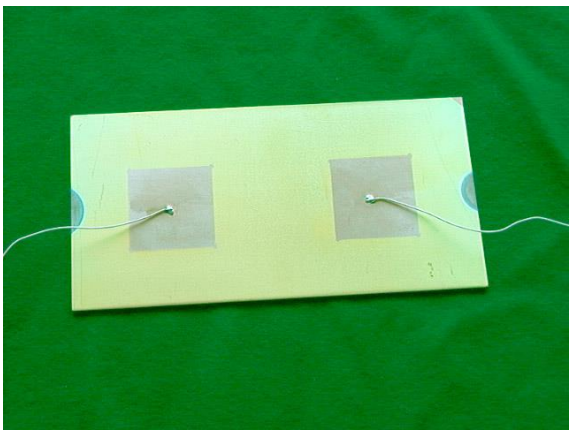


Рис.3. Образец № 8:
Подложка – титановый сплав, толщиной 1,5 мм;
1-ый диэлектрический слой – вакуумнонапыленные чередующие слои оксидов SiO_2 и CrO_2 ;

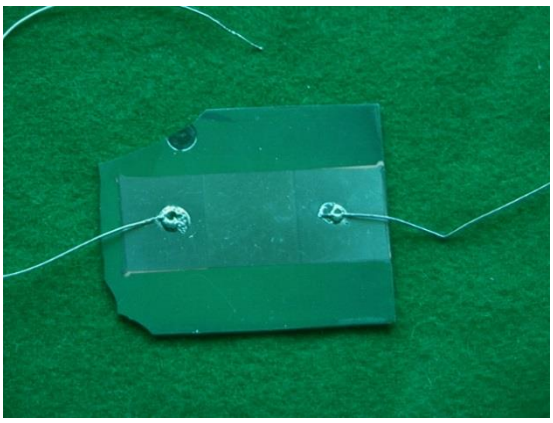


Рис.4. Образец № 1:
Подложка – алюминий;
1-ый изоляционный слой – глубокая оксидировка поверхностного слоя, полностью переводящая материал подложки в окисел алюминия;

Токопроводящего слоя – нет;
Контактные площадки – медь + нихром.

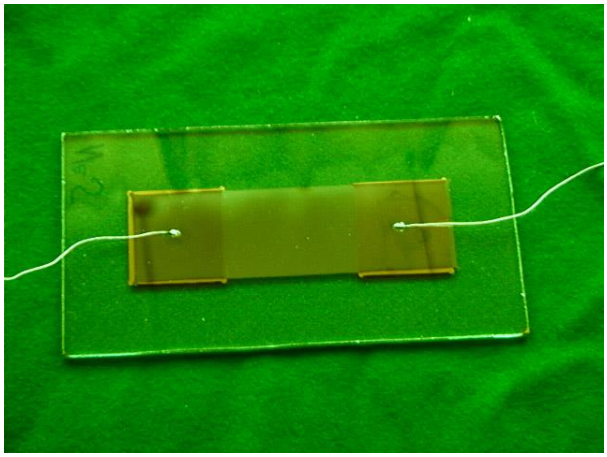


Рис.5. Образец № 9:
Подложка – стекло, выполняющая роль изолятора;
Токопроводящий слой – нихром;
Контактные площадки – медь + нихром.

токопроводящий слой – нихром;
контактные площадки – медь + нихром.

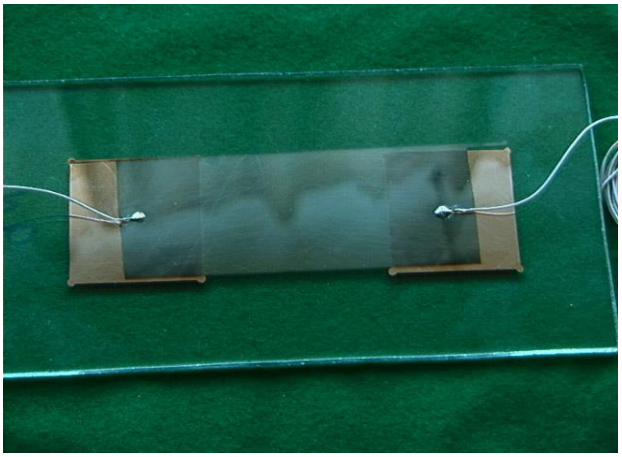


Рис.6. Образец № 10:
Подложка – стекло, выполняющая роль 1-го изолирующего слоя;
Токопроводящий слой – нихром;
Контактные площадки – медь + нихром.

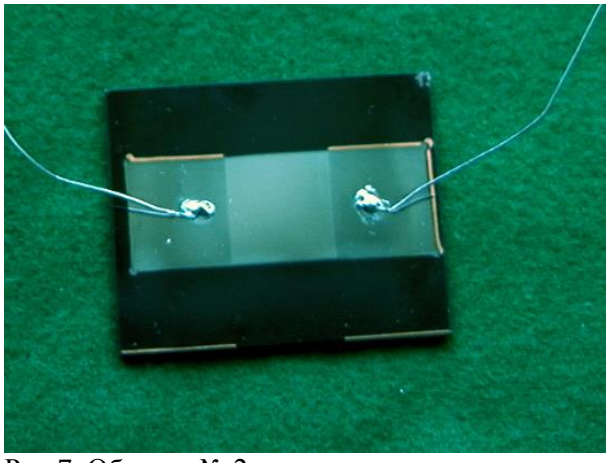


Рис.7. Образец № 2:
Подложка – алюминий толщиной 1,5 мм ;
1-ый изоляционный слой – глубокое оксидирование подложки на глубину не менее 200 мкм с каждой стороны;
Токопроводящий слой (нагревательный элемент) – нихром;
Контактные площадки – медь + нихром.

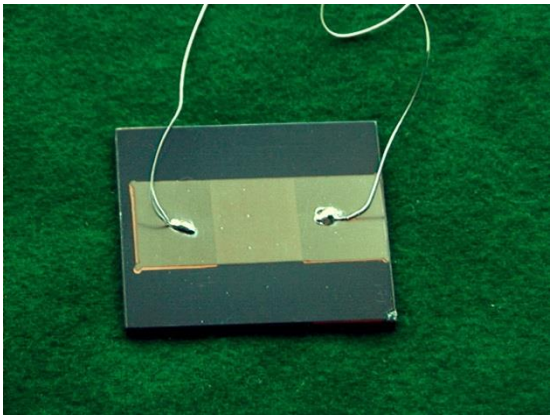


Рис.8. Образец № 3:
Подложка – алюминий толщиной 1,5 мм;
1-ый изоляционный слой – глубокое оксидирование подложки (получение окисла алюминия толщиной не менее 200 мкм с каждой стороны)
Токопроводящий слой – нихром
Контактные площадки – медь + нихром



Рис.9. Образец № 4:
Подложка – алюминиевый сплав АМг6;
Диэлектрический слой – гексаметилдисилоксана, осажденный в высокочастотной кислородной плазме, приобретающий после осаждения структуру модифицированных окислов SiO_2, толщина слоя 10-13 мкм;
Токопроводящий слой – нихром;
Контактные площадки – медь + нихром.

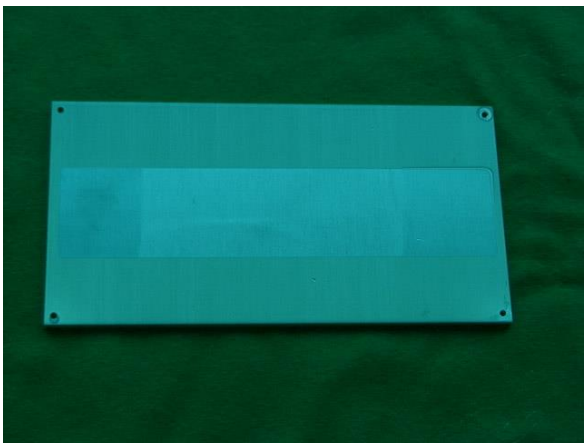


Рис.10. Образец № 5:
Подложка – алюминиевый сплав АМг6, толщиной 3,0 мм, предварительно подвергнутый химическому травлению;
1-ый диэлектрический слой – комбинированный из слоя электрохимического окисла гексаметилдисилоксана + композит на основе оксида кремния;
Токопроводящий слой – нихром;
Контактные площадки – медь + нихром.

Литература

1. *Григорьева И.С., Мейлихова Е.З* .Справочник. Физические величины. М.: Энергоатомиздат - 1991. – 1234 с.
2. *Горелик С.С., Дашевский М.Я.* Материалы для производства изделий электронной техники. М.: Высшая школа - 1987. – 575 с.
3. *Ткачук Б.В., Колотыркин В.М.* Получение тонких полимерных пленок из газовой фазы. М.: Химия -1977. – 585 с.
4. *Дроздов Н.Г., Никулин Н.В*. Электроматериаловедение. Учебник для проф.-техн. учебных заведений и подготовки рабочих на производстве. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Высшая школа - 1973. -312 с.
5. *Горелик С.С., Дашевский М.Я.* Материаловедение полупроводников и диэлектриков: Учебник для вузов. М.: Металлургия -1998. -547 с.
6. *Ямпольский А.М., Ильин В.А*. Краткий справочник гальванотехника. М.: Машгиз - 1962. -244 с.

УДК 669.715:621.78

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СВАРНЫХ ТОНКОЛИСТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Любовь Николаевна Мищук,
студентка 5 курса,
кафедра « Материаловедение»
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Ю.А. Пучков,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение»

Повышенная скорость нагрева и охлаждения являются причинами образования трещин в тонколистовых сварных конструкциях из алюминиевых сплавов. Образование трещин в этом случае возможно даже в случае применения лазерной сварки, отличающейся низким тепловложением и позволяющей получать узкие сварные швы, при кристаллизации которых усадка и возникающие в шве и околошовной зоне растягивающие напряжения минимальны [1]. Выявление причин образования трещин осложнено, поскольку при сваривании происходит: нагрев, плавление, кристаллизация и охлаждение металла. Все эти процессы протекают в различных участках зоны сварки одновременно.

Целью данной работы является исследование причин и природы возникающих трещин в тонколистовых сварных соединениях из алюминиевых сплавов при лазерной сварке.

Материалом сварных соединений служили листы толщиной от 1 до 3 мм из алюминиевых сплавов АМц, АМг3, АМг6, АСВ-1 (табл. 1). Сварные соединения в виде тавра, тавра на шипах, уголка, уголка на шипах, крестовины (рис. 1) были получены, применяя автоматизированную лазерную установку LRS-300AU, рабочим инструментом которой является сфокусированный луч импульсного твердотельного лазера, работающего в режиме свободной генерации. Соединения в виде тавра на шипах, уголка получены однопроходной сваркой; тавра - двусторонней сваркой, а крестовины - сваркой с четырех сторон, т.е. шов и околошовная зона в этих случаях подвергались как минимум двукратному нагреву и охлаждению. Основные направления теплоотвода из сварного шва, изображенные стрелками на схеме (рис. 2), обуславливают направления преимущественного роста кристаллитов, образующихся при охлаждении из жидкого состояния. Полученные образцы исследовали металлографическим, дюротометрическим и фрактографическим методами с применением микроскопов Olympus SZ61, GX51, микротвердомера DuraScan и сканирующего микроскопа TESCAN VEGA 2 LMH.
Исследования макроструктуры, выполнены при увеличении 20 – 50 крат на микроскопе Olympus SZ61, показали, что наряду с качественными сварными соединениями (рис. 3) при недостаточно тщательно выбранных режимах сварки в шве и околошовной зоне возможно появление дефектов в виде трещин, пор и оксидных пленок.

Таблица 1. Химический состав исследованных сплавов, % (мас.) (ГОСТ 4784 – 74 и ТУ 1-809-680-85)

Сплав	Al	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Cr
АМц	Остальное	До 0,15	До 0,2	1,0 – 1,6	0,7	До 0,6	0,1	До 0,2	–
АМг3	Остальное	До 0,1	До 3,8	0,3 – 0,6	0,5	0,8	0,2	До 0,1	0,05

АМг6	Остальное	До 0,1	До 6,8	0,5 – 0,8	0,4	0,4	0,2	0,10	–
АСВ-1	Остальное	0,15	0,2	1,0–1,6	0,7	0,6	0,1	0,2	–

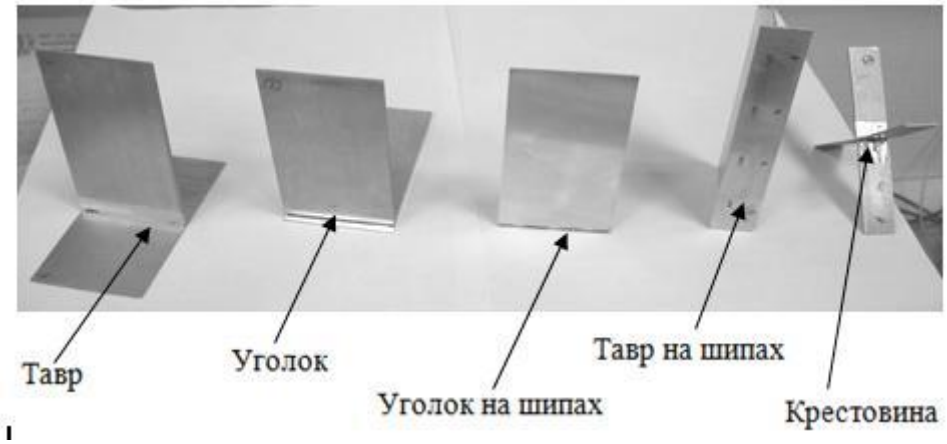


Рис. 1. Внешний вид сварных соединений, полученных лазерной сваркой

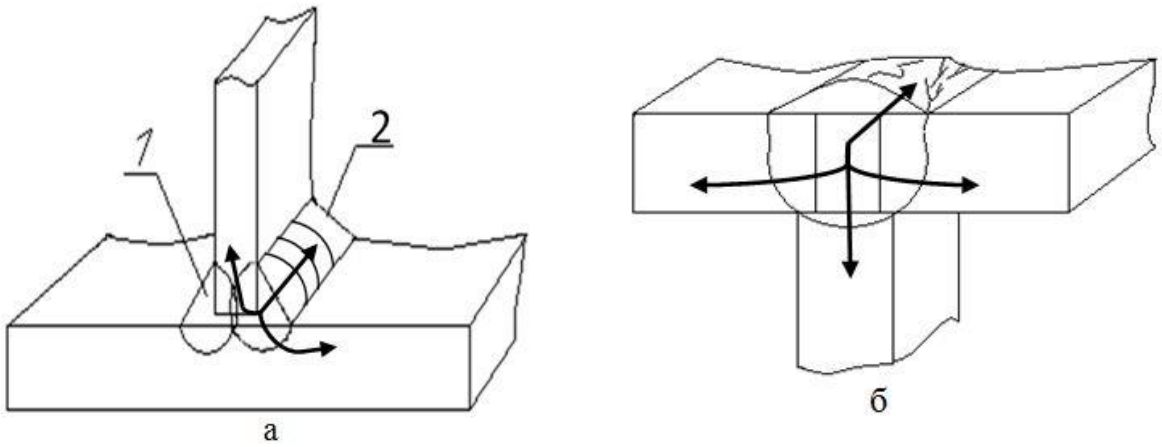


Рис. 2. Направления тепловых потоков при охлаждении сварных соединений разного типа: а – тавр, б – тавр на шипах

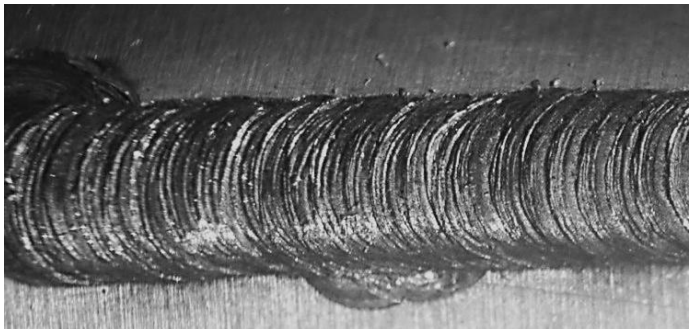
Трещины узкие, имеют преимущественно продольный характер, наиболее вероятны в начале (рис. 3) и завершении сварного шва, однако их образование наблюдается также в шве (рис. 5) и зоне термического влияния.

Характерная шаровидная форма пор указывает на их водородное происхождении. Наибольшее количество пор наблюдается в начале и завершении шва. В ряде случаев поры спровоцировали образование трещин (рис. 4).

При недостаточно тщательной подготовке поверхности и нарушении режима подачи инертного газа в сварной шов могут попадать пленки оксидов, способствующих образованию водородных пор и ухудшающих перемешивание металла в сварной ванне.

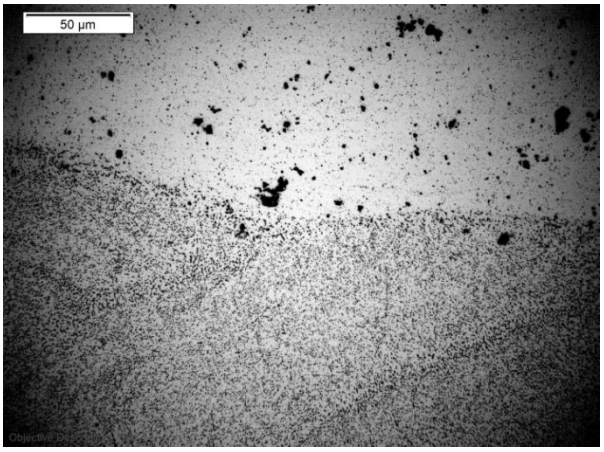
Для оценки склонности к образованию трещин рассчитывали отношение суммы длин трещин $L_{тр}$ на участке шва к длине этого участка $L_{шва}$. Из рассмотренных сплавов самую высокую склонность к образованию трещин показал наиболее легированный сплав АМг6, самую низкую – наименее легированный сплав АМц. Сплавы АМг3 и АСВ-1 имеют приблизительно одинаковую склонность к образованию трещин (рис. 6). Наименьшая склонность к образованию трещин наблюдается в соединении «Тавр на шипах», полученном в результате однопроходной сварки, в остальных соединениях

склонность к образованию трещин выше, так в этих соединениях часть сварных швов или их отдельных участков подвергаются повторному нагреву и охлаждению.



а

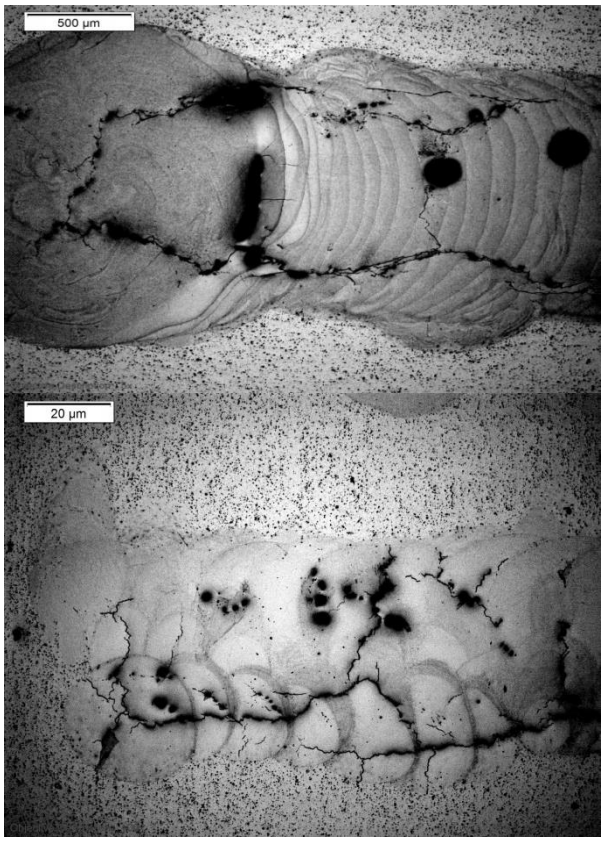
х20



б

х1000

Рис. 3. Макро- (а) и микроструктура (б) сварного соединении типа «Уголок на шипах» из сплава АМг6



а

б

Рис. 4. Трещины и поры в сварных соединениях
а – Начало шва в соединении «Тавр на шипах» из сплава АМц, х50,
б – Участок шва в соединении «Тавр» из сплава АМг3, х50

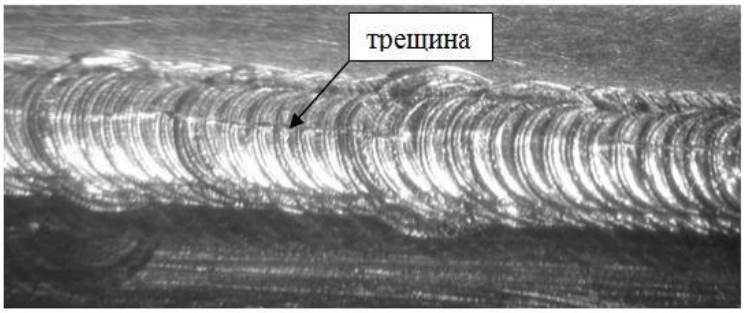


Рис. 5. Продольная трещина в сварном шве соединения типа «Уголок» из сплава АСВ-1, х20

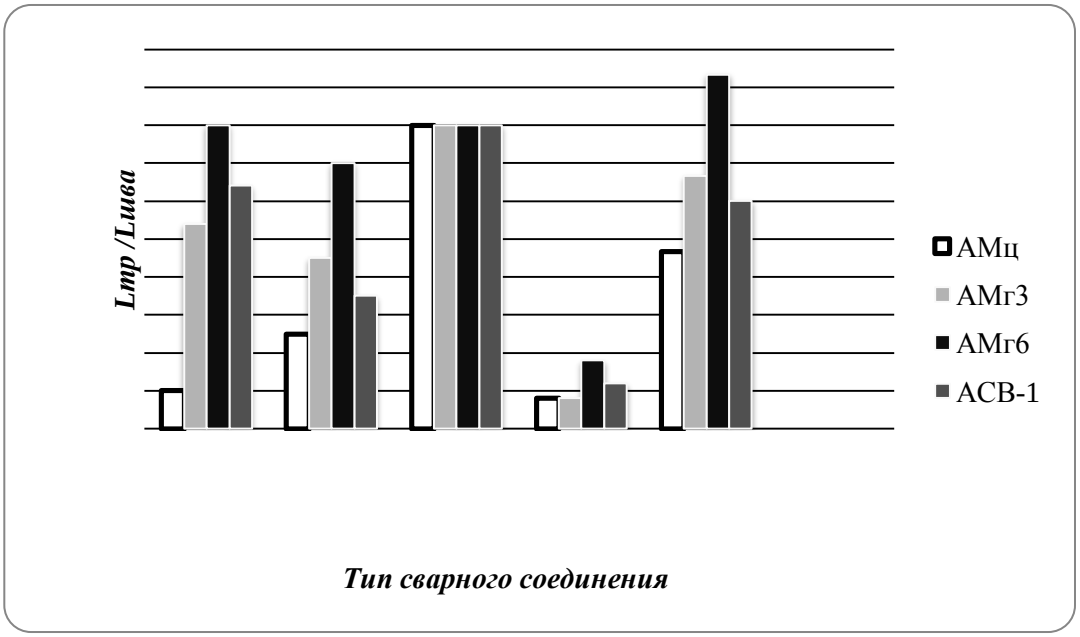


Рис. 6. Диаграмма зависимости склонности к образованию трещин от марки алюминиевого сплава и типа сварного соединения

Металлографическим методом показано, что шов состоит из дендритов первого порядка, так, высокие скорости охлаждения не позволяют сформироваться дендритам второго порядка. Дендриты имеют ячеистую структуру, формирующуюся в результате пластической деформации во время температурного цикла сварки. На границах ячеек в процессе охлаждения, повторного нагрева образуются мелкие включения интерметаллидов. Трещины преимущественно распространяются по границам дендритов, на границах которых в зависимости от степени легированности сплава, условий охлаждения при сварке и кратности повторного нагрева появляется или сегрегация легирующих элементов или образуется сетка из хрупкой интерметаллидной фазы [2].

Увеличение склонности к образованию трещин увеличивается с ростом твердости металла и сплава (табл. 2).

Таблица 2. Микротвердость исследованных сплавов и сварных швов

Сплав	Твердость сплава, HV0,2	Твердость шва, HV0,2
АМг6	108	98,6
АМг3	64,2	70,2

АМц	66,3	59
АСВ-1	70,0	73,3

Фрактографическим методом с использованием электронной сканирующей микроскопии показал, что в околошовной зоне, а при повторном нагреве и в шве, образуются преимущественно ликвационные трещины, которые являются разновидностью горячих трещин. Ликвационные трещины образуются в результате локального расплавления легкоплавкой эвтектики на границах дендритов шва, зерен ЗТВ, и пластического деформирования напряжениями, возникающими при сварке. Они могут возникать в ЗТВ в сварных соединения, полученных за один проход, а также в шве и ЗТВ при использовании нескольких проходов. На рис. 4б отчетливо видны два шва, один из которых, узкий, образовался в результате второго прохода по обратной стороне листа, что вызвало в последнем образование трещин. Высокая скорость охлаждения при лазерной сварке способствует образованию одноосных дендритов на оплавленных границах и формированию плоского фронта кристаллизации. Складки на формирующейся поверхности кристаллизации появляются под действием напряжений, возникающих при сварочном цикле. Таким образом, ликвационные трещины приобретают характерную плоскую поверхность с имеющимися на ней складками. По внешнему виду они существенно отличаются от горячих трещин, образующихся при охлаждении из жидкого состояния со средними скоростями, характерными для TIG и MIG сварки и имеющими на поверхности множественные округлые дендриты второго порядка.

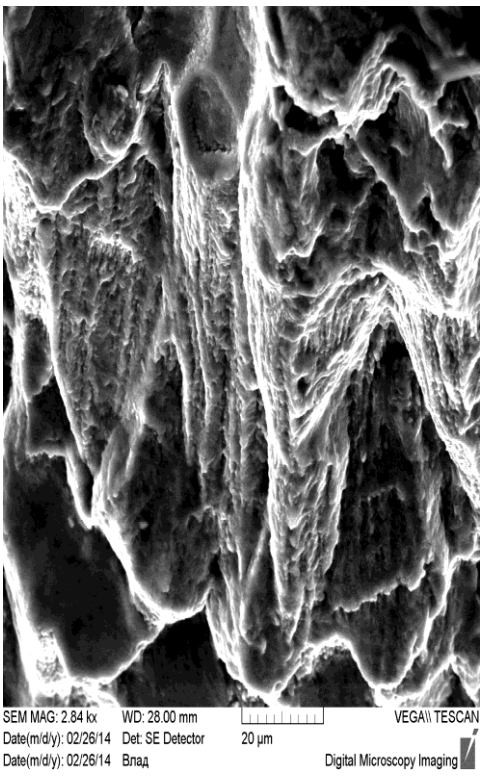
Ликвационные трещины наблюдали преимущественно в сварных соединениях, которые получали за несколько проходов, когда трещины возникали в сварном соединении при его повторном нагреве в результате выделения тепла при наложении следуюшего шва, находящегося в непосредственной близости и отделенного узким листом из теплопроводного алюминиевого сплава (рис. 2, 4б).

Важным фактором, способствующим образованию горячих трещин в соединениях, полученных лазерной сваркой, является ее скорость. Собирательная рекристаллизация, развивающейся при повышенной температуре в пластически деформированном металле ЗТВ, также способствует образованию горячих трещин в зоне термического влияния является.

Из рассмотренных сплавов наибольшая доля вязкой составляющей излома с характерным ямочным рельефом наблюдается в сварных соединениях из сплава АСВ-1.



а



б

Рис. 7. Топография поверхности трещины в соединениях, полученных лазерной сваркой: а – ликвационная в ЗТВ соединения типа «Тавр» из сплава АМг3,
б - горячая в шве в соединении типа «Уголок на шипах» из сплава АМг6

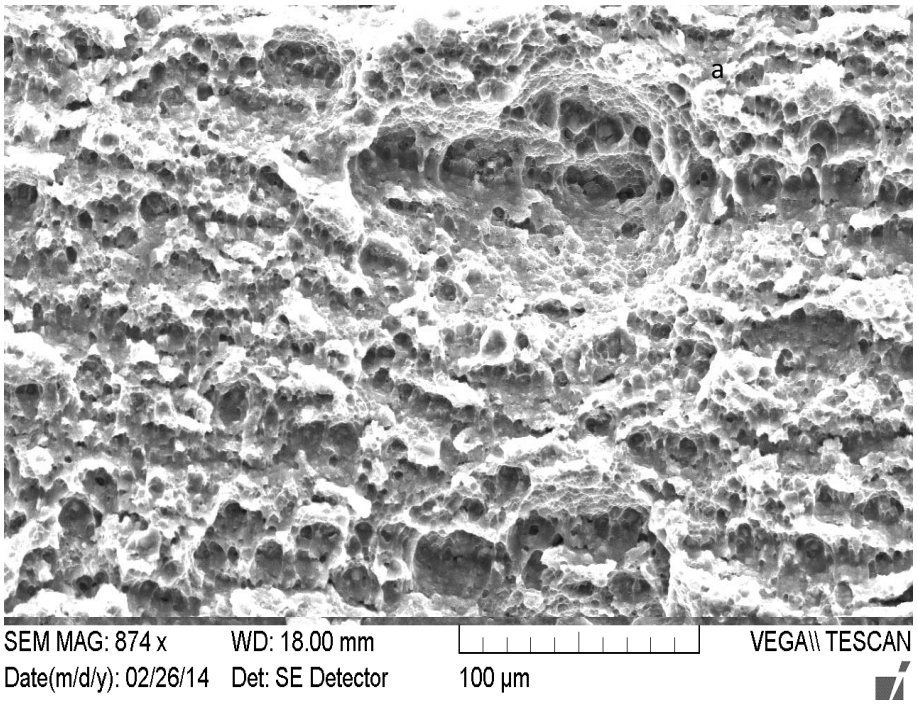


Рис. 8. Вязкий излом с ямочным рельефом на поверхности долома вблизи трещины в сварном соединении «Крестовина» из сплава АСВ-1

Выводы

Дефектами сварных тонколистовых соединений, полученных методом лазерной сварки, являются горячие трещины, а также водородные поры и оксидные пленки, способствующие их образованию.

Трещины имеют преимущественно ликвационный характер и образуются в основном при повторном нагреве шва при многопроходной сварке.

При повышенных скоростях сварки уменьшается тепловложение, а, следовательно, увеличивается скорость охлаждения. При этом на границах дендритов и зерен снижается уровень сегрегации или уменьшается количество легкоплавкой эвтектики, что приводит к снижению склонности к образованию трещин.

Литература

1. *Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. , Мисюров А.И.* Технологические процессы лазерной обработки: Учеб. пособие для вузов / Под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 664 с.
2. *Шиганов И. Н., Холопов А. А.,* Лазерная сварка алюминиевых сплавов. // Научно-технический журнал «Фотоника». – 2010. – №3. – С. 3–35

УДК

ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ПРОВОЛОКИ

Илья Сергеевич Семенцов,
студент 6 курса,
кафедра «Материаловедение»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: М.В. Унчикова,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение»

Процесс постепенного накопления повреждений материала под действием переменных напряжений, приводящий к изменению свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению, называется усталостью. Способность же материалов воспринимать эти повторные и знакопеременные напряжения без разрушения называется сопротивлением усталости или циклической прочностью [1].

Прочность материалов и конструкций при повторных нагружениях – обширный и чрезвычайно важный для практики раздел современной науки о прочности. Сложный и многофакторный характер процессов разрушения, их зависимость от истории нагружения, разнообразие явлений, приводящих к образованию и развития трещин привели к широкому использованию феноменологического подхода с дифференциацией методов расчета по крупным группам явлений. Раздельно рассматриваются многоцикловая усталость, при которой трещины развиваются на фоне упругого деформирования конструкции в целом, и малоцикловая усталость, связанная с повторным пластическим деформированием части конструкции, большой по сравнению с размерами структурных составляющих (зерен, пор, включений) [2].

Чтобы понять механизм возникновения усталостных напряжений разберем пример работы оси железнодорожного вагона. Вначале рассмотрим случай, когда вагон неподвижен. На рис. 1 показаны обусловленные действием силы тяжести P эпюры изгибающего момента и нормальных напряжений в сечениях среднего участка оси. При движении вагона по ровному участку пути, когда колебания его корпуса отсутствуют и внешние силы остаются неизменными, вращение осей приводит к изменению положения точек на поверхности сечений по отношению к плоскости действия постоянного изгибающего момента $M = P_a/2$ (на рис. 1 цифрами 1…8 показаны различные положения одной из точек на поверхности сечения).

Таким образом, за время одного оборота колеса в каждой точке поверхности оси железнодорожного вагона напряжения изменяются во времени по гармоническому закону σ (t), проходя нулевые значения (положения точки 1 и 5) и достигая максимальных значений растягивающих и сжимающих напряжений (положения точки 3 и 7 соответственно). Частота изменения напряжений определяется скоростью движения поезда. Легко убедиться в том, что во время одного рейса поезда дальнего следования Москва- Владивосток-Москва описанный цикл изменения напряжений в осях вагонов повторяется более пяти миллионов раз [2].

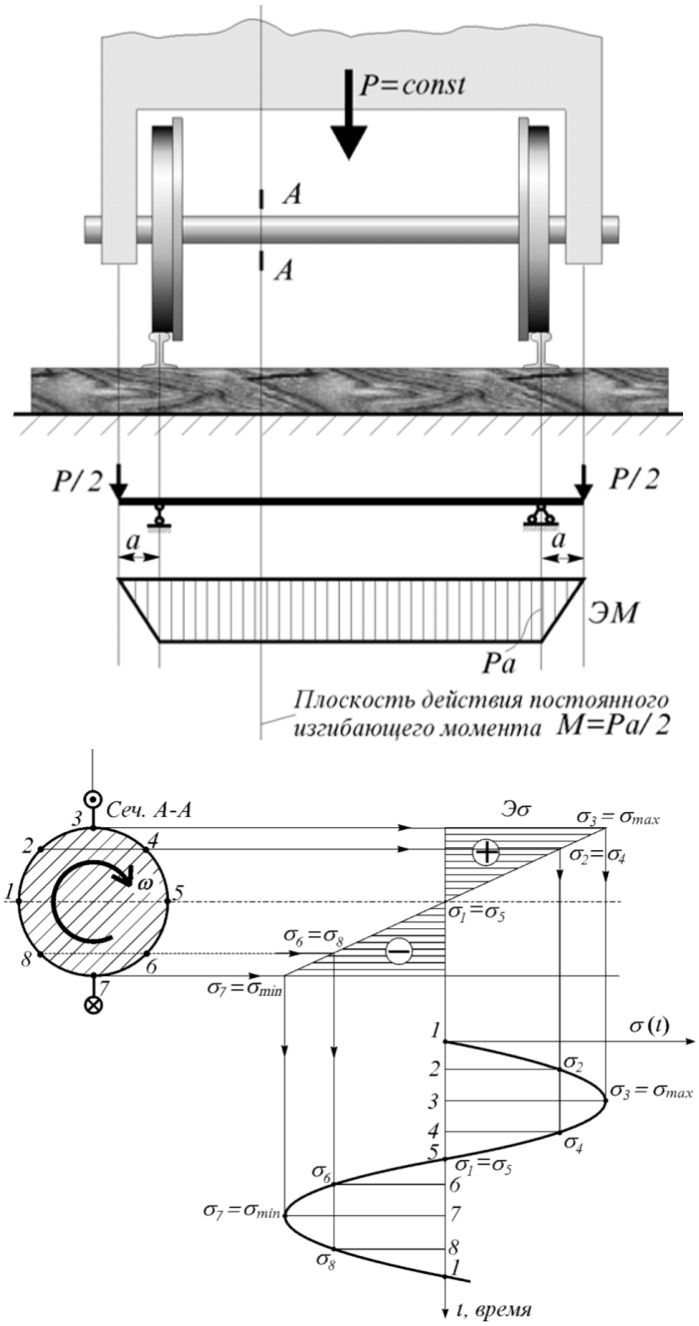


Рис. 1. Работа оси железнодорожного вагона

Циклические испытания механических свойств материалов имеют важное значение, поскольку большинство деталей машин, транспортных и других конструкций в процессе работы претерпевают воздействие переменных нагрузок. Под действием циклических напряжений в материалах зарождаются и постепенно развиваются трещины, вызывающие в конечном итоге полное разрушение. Такие разрушения особенно опасны, потому что могут протекать под действием напряжений, намного меньших предела

текучести. Большинство случаев эксплутационного разрушения происходит в результате циклического разрушения.

На рис. 2 в общем виде представлена полная кривая усталости в диапазоне напряжений от временного сопротивления разрушению (предела прочности) до предела выносливости (предела усталости). Конечно, построение полной кривой усталости в большинстве случаев носит условный характер, так как для получения полного спектра амплитуд напряжений или деформаций часто требуются различные типы испытательных машин.

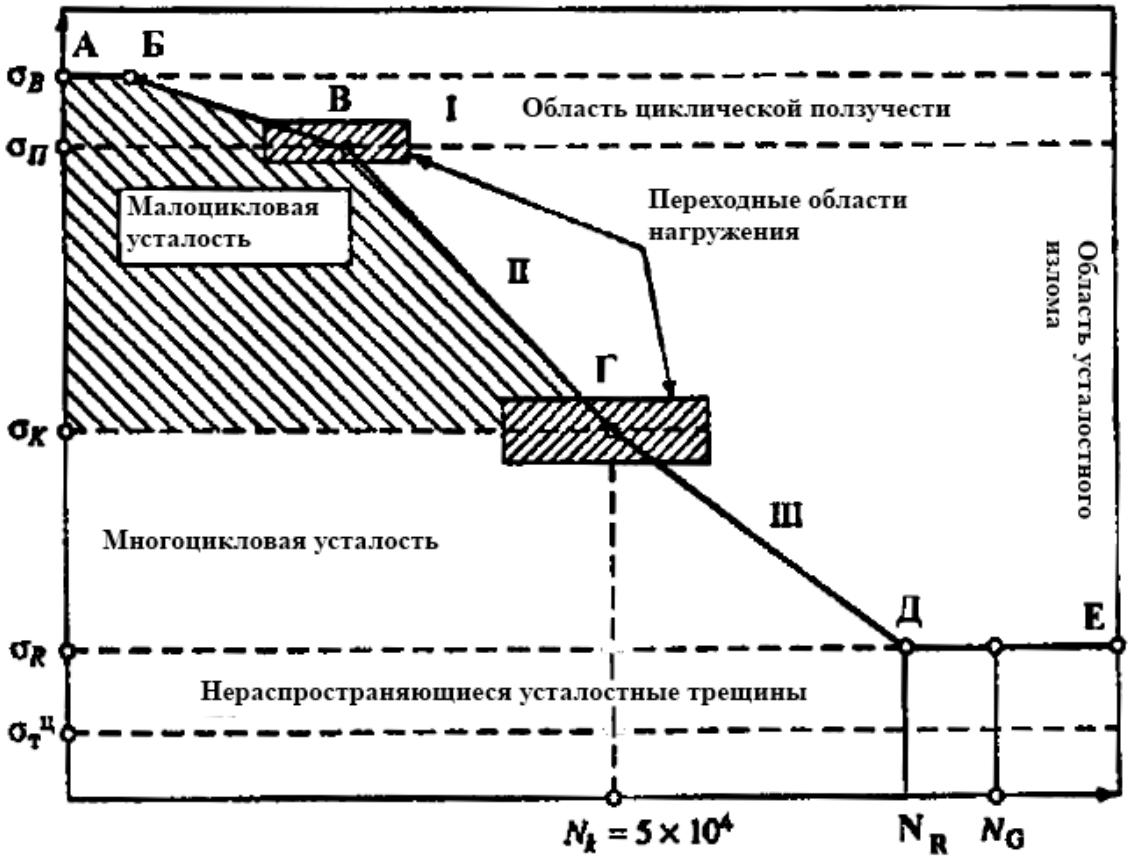


Рис. 2 Кривая усталости в общем виде

Задача усталостных испытаний – дать количественную оценку способности материала работать в условиях циклического нагружения без разрушения.

Цель большинства усталостных испытаний определение долговечности при напряжениях, меньших статического предела текучести и больших базах испытаний (до 10^8 циклов нагружения). В ряде случаев для оптимального проектирования требуется знать поведение материала, как правило, при высоких циклических напряжениях (больших предела текучести), вызывающих усталостное разрушение после сравнительно небольшого числа циклов изменения напряжений или деформаций. Поэтому наряду с построением обычных кривых усталости большое развитие получили работы по исследованию несущей способности материалов при малоцикловой усталости (база испытания от $5*10^4$ до 10^5циклов нагружения N) [1].

Реальные детали машин отличаются от образцов конструкторско-технологическими особенностями и условиями нагружения, которые должны быть учтены при расчете конкретных деталей. Кратко рассмотрим наиболее значимые факторы, определяющие усталостную прочность деталей.

1. Концентрация напряжений – эффект снижения предела выносливости, обусловленный местным увеличением (рис. 3) напряжений и изменением характера напряженного состояния по сравнению с номинальными в зоне резкого изменения

очертания детали (у отверстий, канавок, резьбы, в галтельных переходах от одного сечения к другому, в зонах сварочных швов и т.п.);

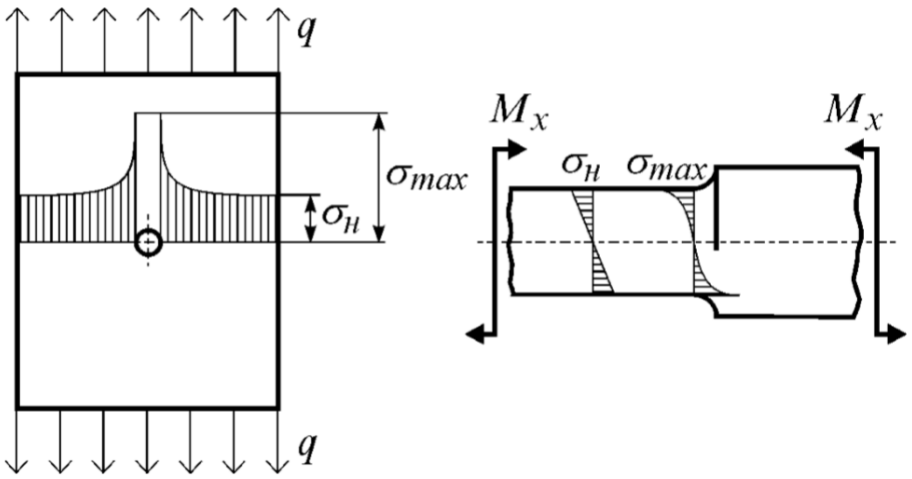


Рис. 3 Концентраторы напряжений

2. Масштабный эффект, проявляется в виде снижения предела выносливости материала с увеличением размеров испытываемых образцов. Очевидно, этот эффект объясняется тем, что с увеличением объема рабочей части образца возрастает вероятность наличия в ней металлургических и технологических микродефектов;

3. Качество обработки поверхности значительно влияет на усталостные свойства деталей, поскольку их наружные слои часто оказываются наиболее напряженными (изгиб, кручение, внецентренное растяжение и др.);

4. Методы технологического упрочнения поверхности детали позволяют в ряде случаев значительно повысить выносливость за счет наклепа поверхностного слоя, ликвидации части микродефектов и создания остаточных сжимающих напряжений, препятствующих образованию трещин на поверхности детали;

5. Комплексный учет влияния основных конструкторско-технологических факторов на усталостную прочность деталей. Результирующее влияние основных факторов можно учесть введением в расчеты предела выносливости конкретной детали ($\sigma_{-1Д}$), который получают путем корректировки предела выносливости материала (σ_{-1}), определенного при стандартных испытаниях лабораторных образцов;

6. Учет асимметрии циклов напряжений. Приводимые в справочной литературе характеристики выносливости материалов обычно получают в результате проведения стандартных лабораторных испытаний, при которых в образцах воспроизводятся симметричные циклы напряжений ($\sigma_m = 0$, $\sigma_a = \sigma_{max} = |\sigma_{min}|$, $R = -1$). В отличие от образцов реальные детали машин часто подвергаются действию различных асимметричных циклов, например, в таких условиях работает балка, на которой установлен стационарный агрегат с вращающимся неуравновешенным ротором (рис. 4) [2].

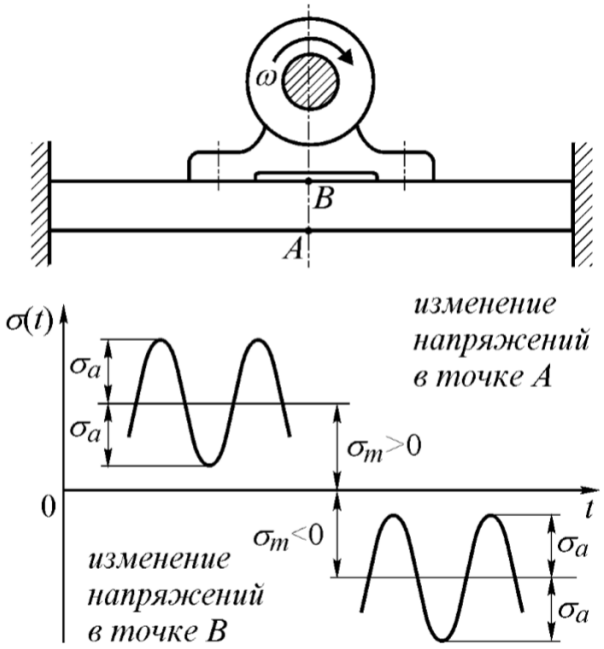


Рис. 4 – Учет асимметрии циклов напряжений

Современные методы испытаний на усталость весьма разнообразны. Они отличаются характером изменений напряжений во времени, схемой нагружения (изгиб, растяжение-сжатие, кручение), наличием или отсутствием концентраторов напряжений. Усталостные испытания проводятся при различных температурах и в разных средах. Основные требования и методика усталостных испытаний обобщены в ГОСТ 25.502-79.

В соответствии с государственным стандартом (ГОСТ 23207-78 "Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения") усталостью называют процесс постепенного накопления повреждений материала под действием переменных напряжений, приводящих к изменению его свойств, образованию и развитию трещин и разрушению. Различают две основные разновидности усталостного повреждения:

1. Малоцикловая усталость возникает при максимальных напряжениях, превышающих предел текучести материала, и сопровождается знакопеременным пластическим деформированием объема материала, большого по сравнению с размерами структурных составляющих (зерен, пор, включений). Число циклов до образования заметной трещины (длиной 0,5 – 1 мм и более) зависит в основном от величины пластической деформации детали в каждом цикле и от способности материала сопротивляться малоцикловому разрушению; для стальных конструкций оно не превышает 104;

Явление малоцикловой усталости знакомо каждому, кто ломал проволоку, пластически деформируя ее в разные стороны.

2. Многоцикловая усталость имеет место при напряжениях значительно ниже предела текучести ($\sigma_{max} < 0{,}6\ \sigma_T$). В этом случае в макрообъеме материал деформируется упруго (его свойства с вполне удовлетворительной точностью описываются законом Гука $\sigma = E\varepsilon$).

Однако большинство реальных материалов имеют сложную многокомпонентную структуру (зерна, поры, межзеренные прослойки, неметаллические включения в стали и т. д.). При упругом деформировании достаточно большого объема в микрообъемах (в отдельных слабых зернах, вблизи дефектов) происходит локальное знакопеременное пластическое деформирование, которое называют микропластическим. Его многократное повторение приводит к зарождению микроскопических трещин. Постепенное их развитие и слияние в магистральную трещину приводит к ослаблению сечений и затем к внезапному долому деталей. Продолжительность стадии многоцикловой усталости к

моменту зарождения магистральной усталостной макротрещины для стальных конструкций превышает $10^5 – 10^6$ циклов.

Для многоцикловой усталости в качестве предельного состояния детали здесь принимается образование магистральной трещины длиной 0,1…0,5 мм, т.е. анализ ограничивается начальной стадией усталостного разрушения. Усталостный излом деталей имеет характерный вид, позволяющий отличать его от разрушений при других видах нагружений (рис. 5).

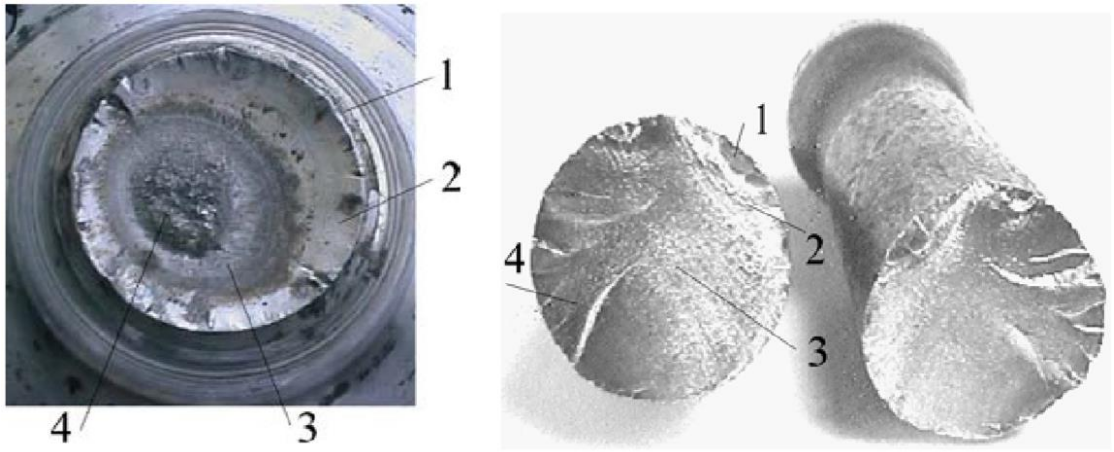


Рис. 5 – Характерный вид усталостного излома автомобильной оси и долота перфоратора

Основные признаки многоциклового излома:

1 – очаг зарождения усталостного повреждения, нередко здесь можно заметить небольшой дефект, с которого начинается развитие трещины – раковину, неметаллическое включение, царапину или забоину; 2 – зона постепенного продвижения трещины, для которой характерна гладкая блестящая поверхность как результат длительного притирания поверхностей; 3 – зона ускоренного развития трещины; 4 – зона долома; она имеет зернистую поверхность, характерную для хрупкого разрушения от статической нагрузки.

Локальные процессы зарождения и первоначального развития трещины не оказывают заметного влияния на деформирование детали в целом, а ускоренное развитие трещины, как правило, непродолжительно. В результате долом часто происходит внезапно и становится причиной аварийных ситуаций. Более 70% всех разрушений технических устройств связано с разрушением от многоцикловой усталости. Отсюда ясно, насколько актуальными являются задачи изучения поведения материалов при циклическом нагружении и разработки методов расчета, обеспечивающих предотвращение усталостных разрушений конструкций в эксплуатации [2].

В данной работе рассматриваются усталостные испытания иного типа, поэтому данный ГОСТ не обобщает полностью требования к испытаниям на усталость.

В последние годы интенсифицировались исследования по изучению усталостной прочности на сверхбольших базах испытания, составляющих 10^9-10^{10}циклов нагружения так называемая гигацикловая усталость. Испытания на таких больших базах бывают необходимы, поскольку ресурс нагружения многих ответственных металлических конструкций, работающих в режиме циклических нагрузок, превышает стандартные базы усталостных испытаний.

Проведение таких испытаний выявило интересную особенность. Металлические материалы, у которых при стандартных базах испытания наблюдался физический предел выносливости, вдруг начинают разрушаться после прохождения 107-109 циклов нагружения, и возникает как бы вторая ветвь гигацикловой усталости и длинная ступенька между кривой многоцикловой и гигацикловой усталости. При этом на больших базах испытаний на усталость (больших 107-108 циклов нагружения) трещины почти всегда

зарождаются не на поверхности, как это обычно наблюдается при многоцикловой усталости, а под поверхностным слоем [1].

Основная проблема при усталостном и статическом испытании тонких проволок являтся проблемность закрепления. При использавании стандартных методов происходит пластическая деформация образца и в следствии этого разрушение в месте захвата.

В данной установке минимальный диаметр ограничивается твердостью проволоки и возможностью изготовления устройства удерживающего проволоку в заданном нагруженном состоянии, к примеру для проволоки диаметром 0,01мм будет необходима лунка соответсвующая диаметру проволоки, примерно 0,02мм, и радиус лунки 5мм. Основной проблемой является сложность изготовления лунки таких маленьких размеров.

Проблема испытания тонких проволок для армирования шин рассматривается в статье компании Instron «Испытание на усталость и разрушение арматурной проволоки для шин».

Проволока и кабель для армирования автомобильных шин востребованы и находят широкое применение в качестве образца стальной продукции. Проволока, тонкая, как волос, укрепляет шину, что помогает выдерживать комплексное нагружение при эксплуатации. Однако, она часто подвергается повреждениям от удара, усталости и разрушения.

Данный тип тонкой проволоки вызывает определенную трудность при захвате из-за тонкости и твердости. Без применения подходящего способа захвата концентрация напряжений на поверхности губки может привести к преждевременному повреждению или разрушению губки. Кроме того, поскольку материал подвергается деформации в малой степени во время испытания, считают, что недостаточно использовать традиционный датчик измерения перемещения для получения точных данных о деформации. Наконец, использование контактных экстензометров может привести к ошибкам, вызванным, например, соскальзыванием острых концов или из-за точек концентрации напряжения.

Instron рекомендует использовать ElectroPuls и сервогидравлическую систему серии 8800 для изучения усталостных свойств и свойств при разрушении проволоки, используемой для армирования шин. Для самых тонких проволок очень важно подобрать подходящий датчик нагрузки, рассчитанный на небольшое усилие, а также подходящие захваты малой массы для успешного проведения динамического испытания.

В данном конкретном случае используют испытательную систему ElectroPuls E1000 рис. 6, оснащенную датчиком Dynacell, рассчитанным на небольшую нагрузку, и миниатюрными цанговыми захватами для тонкой проволоки, которые не вызывают концентрации напряжений. Кроме того, использовалось оптическое цифровое кодирующее устройство на ElectroPuls для наблюдения за данными по перемещению. Испытания проводили с диапазоном нагрузок от 0,5 Н до 1,5 Н с частотой до 80 Гц.

Образцы для испытаний на разрушение были вырезаны из более плотных участков проволоки, на них были сделаны насечки электроэрозионным станком. Затем они подвергались усталостным испытаниям с частотой более 20 Гц, в то время, как оптическая микроскопия использовалась для измерения разрастания трещины [3].



Рис. 6 – Испытательная система для тонких проволок Instron [3]

Также есть статья Instron об испытании нитинола «Циклические испытания на растяжение нитиноловой проволоки».

Нитинол - суперэластичный сплав с эффектом памяти формы, нашедший широкое применение в биомедицинской промышленности. Несколько примеров применения нитинола: стенты, ортодонтические дуги, проводниковые катетеры, фиксаторы для внутренних переломов и щипцы для биопсии. Главная трудность, возникающая при испытаниях нитинола - точность измерения деформации. Часто используют пристяжной экстензометр, однако, он может вызвать изгиб проволоки, ее предварительное повреждение. Кроме того, большинство пристяжных экстензометров не обладают достаточной длиной измерительной базы для точного определения свойств материала.

Instron рекомендует использовать автоматический экстензометр, например, AutoX 750. AutoX 750 имеет высокое разрешение 0.1 µm и точность ± 1 µm с потенциальной длиной рабочего хода 750 мм. Кроме того, плечи экстензометра AutoX находятся в равновесии и управляются с помощью линейной системы управления, при этом практически не возникает трение. Система позволяет плечам быть "невесомыми", они не оказывают никакого влияния на свойства материала (рис. 7).

Для данного испытания использовалась электромеханическая настольная машина, оснащенная датчиком нагрузки 1 кН и пневматическими боковыми захватами 1 кН. Образцы, проходящие данное испытание были 1 мм в толщину; таким образом, боковые захваты - идеальный выбор для данного испытания. Для образцов большего диаметра рекомендуется использовать боковые захваты или механические клиновые захваты, тогда как, для тонкой нитиноловой проволоки подходящим решением будут пневматические захваты для проволоки и волокон. Последние захваты позволяют точно выравнивать образцы и сокращать концентрацию напряжений на поверхности захватов, которая в противном случае может привести к повреждению образцов.

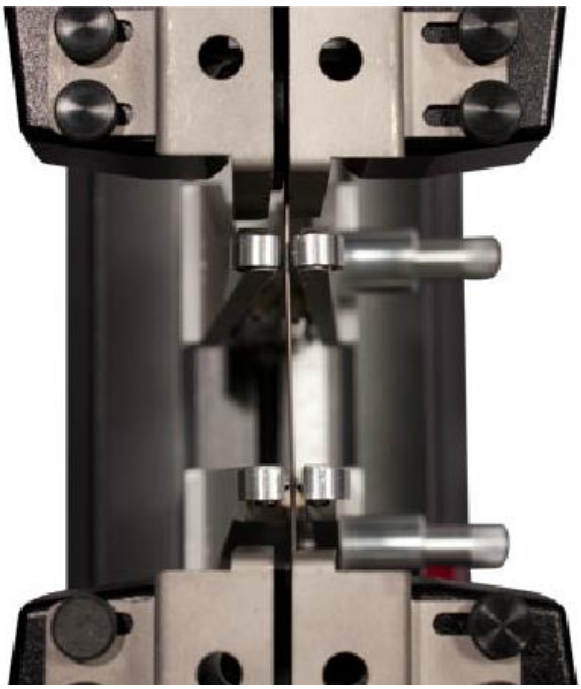


Рис. 7. Автоматический экстензометр AutoX 750 [4]

Базовой конструкцией испытательной установки служит патент под названием «Установка для усталостных испытаний тонких проволок».

Изобретение данной установки относится к машиностроению, а именно к области механических испытаний материалов. Установка содержала набор пластин, расположенных перпендикулярно оси вращения патрона. Пластины установлены в обойме с возможностью перемещения относительно друг друга и зафиксированы относительно обоймы посредством узлов фиксации. Крышка, закрепленная на обойме, взаимодействует с одноименными торцами пластин. Криволинейный канал устройства для создания в испытуемом образце изгибной нагрузки образован крышкой и пазами, выполненными в торцах пластин, взаимодействующих с крышкой. Толщина пластин и размер паза составляют 1 - 5 диаметров испытуемого проволочного образца. Установка оснащена датчиком числа оборотов привода вращения патрона и датчиком регистрации разрушения испытуемого проволочного образца, функционально связанным с источником питания привода.

Данное устройство может быть использовано для испытаний проволок диаметром 0,1...2 мм.

Известна установка для усталостных испытаний тонких проволок, защищенная авторским свидетельством СССР N 987460 кл. G 01 N 3/34, принятая за прототип. Известная установка содержит патрон для закрепления образца, привод его вращения и устройство для создания в образце изгибной нагрузки, имеющее обойму с криволинейным каналом для размещения рабочей части образца, выполненным с переменным радиусом кривизны по длине.

Недостатком данной установки являются ее низкие эксплуатационные характеристики. Это объясняется тем, что для каждого радиуса изгиба, а значит - каждого сочетания диаметра проволоки, ее модуля упругости и задаваемого напряжения (относительной деформации) требуется индивидуальное устройство для создания в образце изгибной нагрузки, а также сложностью и неточностью определения количества циклов нагружения до момента разрушения.

Технической задачей, решаемой предлагаемым изобретением, является повышение эксплуатационных характеристик установки за счет обеспечения использования установки с одним устройством для создания в образце изгибной нагрузки, для широкой области сочетаний диаметра проволоки, ее модуля упругости и задаваемого напряжения

при одновременном обеспечении точной регистрации количества циклов нагружений до момента разрушения образца.

Поставленная техническая задача достигается тем, что в известной установке для усталостных испытаний тонких проволок устройство для создания в образце изгибной нагрузки выполнено в виде полой обоймы с крышкой, внутри обоймы установлен набор пластин, расположенных перпендикулярно оси вращения патрона, с возможностью взаимного перемещения относительно друг друга и зафиксированных относительно обоймы посредством узлов фиксации, одноименные торцы пластин взаимодействуют с крышкой обоймы, а криволинейный канал устройства для создания изгибной нагрузки образован крышкой обоймы и пазами, выполненными в торцах пластин, взаимодействующих с крышкой, при этом толщина пластин, установленных в обойме, и размер паза в них составляет от 1 до 5 диаметров испытуемой проволоки, а установка оснащена датчиком числа оборотов привода вращения патрона и датчиком регистрации разрушения испытуемого образца, функционально связанным с источником питания привода.

На рис. 8 показан общий вид установки. На рис. 9 показан вид А. На рис. 10 показан выносной элемент Б.

Установка для усталостных испытаний тонких проволок содержит патрон 1 для крепления проволочного образца 2, привод 3 для вращения патрона 1 и устройство для создания в образце изгибной нагрузки, выполненное с криволинейным каналом 4 в виде полой обоймы 5 с крышкой 6. Внутри обоймы 5 установлен набор пластин 7, расположенных перпендикулярно оси вращения патрона 1, с возможностью перемещения относительно друг друга и зафиксированных относительно обоймы 5 посредством узлов фиксации 8. Одноименные торцы пластин взаимодействуют с крышкой 6 обоймы 5, криволинейный канал 4 устройства образован крышкой 6 и пазами 9, выполненными в торцах пластин 7, взаимодействующих с крышкой 6.

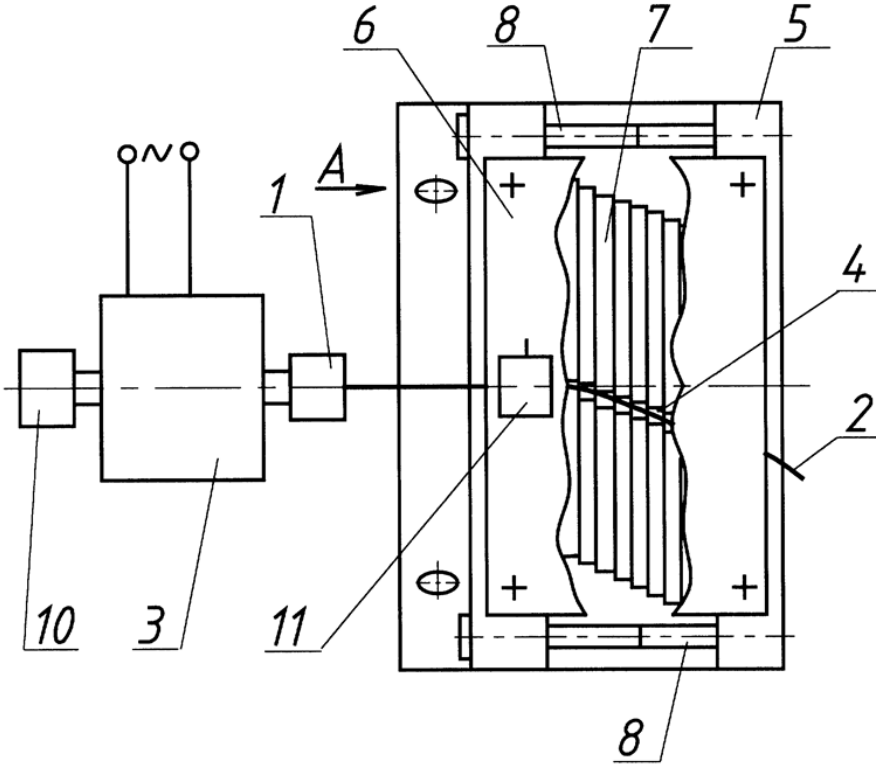


Рис. 8. Общий вид установки

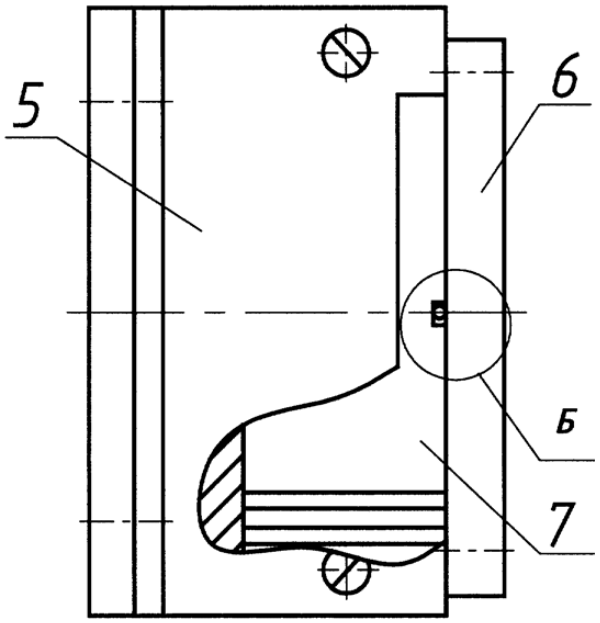


Рис. 9. Вид А

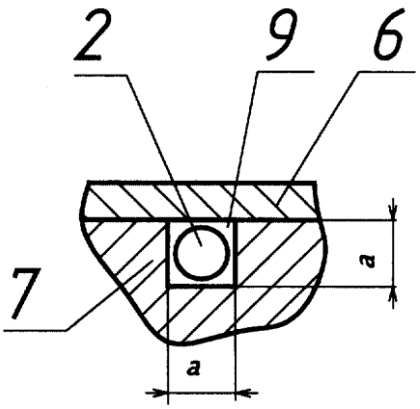


Рис. 10. Вид Б

При этом толщина пластин 7, установленных в обойме 5, и размер "а" паза 9 в них составляет от 1 до 5 диаметров испытуемого проволочного образца 2. Кроме того, установка оснащена датчиком 10 для контроля числа оборотов привода 3 вращения патрона 1 и датчиком 11 для регистрации факта разрушения проволочного образца 2, функционально связанным с источником питания привода 3 и отключающим привод 3 при разрушении проволочного образца 2.

Выполнение установки для усталостных испытаний тонких проволок с устройством для создания изгибных нагрузок позволяет без существенных изменений установки, только за счет перемещения пластин 7 относительно друг друга проводить испытания образцов из тонкой проволоки 2 с большим интервалом изменения диаметра при различных изгибных напряжениях (различной кривизне канала). Оснащение установки датчиком 10 для определения числа оборотов патрона 1 и датчиком 11 для регистрации факта разрушения проволочного образца 2 позволяет точно контролировать число циклов нагружения образца до разрушения. Все это вместе существенно повышает эксплуатационные характеристики установки [5].

Подводя итоги и учитывая, что практически все материалы испытывают усталостную нагрузку можно утверждать, что данный вид испытаний играет очень важную роль в материаловедении и машиностроении. В идеальном случае возможно испытать любой материал из которого возможно изготовить проволоку и который имеет определенный запас пластичности.

С помощью разработанной установки возможно выбирать количество циклов в пределах от 0 до 999999999 циклов и останавливать испытание. Наибольшее число циклов ограничивается износосойкостью испытательной платформы и счетчиком оборотов и равно 109 циклов, что в большинстве случаев циклических испытаний более чем достаточно.

В следствии того, что данная установка была изобретена в начале 80-х годов, она морально и физически устарела. Было принято решение с нуля создать современный аналог установки, обеспечить необходимую точность в системе нагружения образца и усовершенствовать системы подсчета циклов и отключения установки при обрыве проволоки.

После обновления установки необходимо провести испытания и сравнить данные полученные на предыдущем варианте испытательного стенда.

По возможности расширить круг материалов испытанных на установке.

Главным критерием новой установки является простота в эксплуатации и обслуживании, надежность, дешевизна и доступность составных частей и точность получаемых данных.

Каркас установки и корпус управления испытанием изготовлен из оргстекла, это связано с тем, что данный материал относительно хорошо обрабатывается резанием и очень хорошо деформируется при нагревании.

Для приведения проволоки во вращательное движение используется коллекторный электродвигатель постоянного тока, с постоянными магнитами, производство компании «ATAS Elektromotory» Чехия рис. 11.

Данный двигатель имеет широкий диапазон регулирования оборотов вращения, что способствует заданию необходимых параметров испытания, а так же продолжительности испытания и, что не мало важно, большой запас ресурса. Так же вал данного электромотора имеет выход с 2-х сторон, что необходимо для размещения элементов закрепления проволоки и подсчета количества оборотов. Зарубежный производитель выбран из соображений надежности и относительно небольшой стоимости мотора.

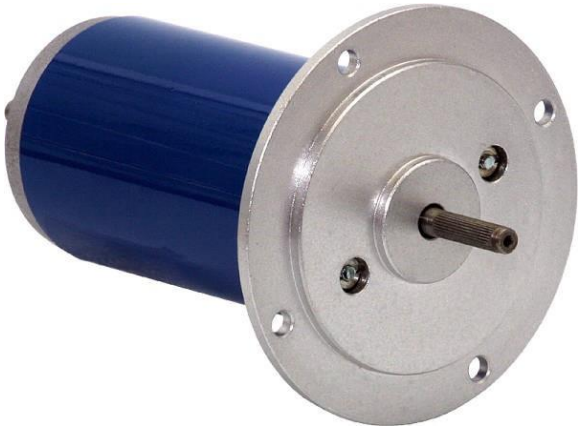


Рис.11. Коллекторный электродвигатель постоянного тока с постоянными магнитами

Характеристики:

- Напряжение питания – 24В;
- Ток – 1.5А;
- Мощность – 25Вт;
- Максимальные бороты – 5800Об/мин;
- Масса – 0.5кг.

Блок питания (NES-150-24) (рис. 12) преобразует напряжение 220 В в «безопасные» 24В, служит источником тока для всех потребителей в установке, подобран, прежде всего, по схожим с мотором, как основным потребителем мощности, характеристикам и запасом мощности и тока.

Данный блок питания имеет важные особенности:

- Защиту от короткого замыкания, перегрузки, высокого напряжения;
- Входное напряжение возможно выбирать переключателем;
- Протестирован при максимальной нагрузке;
- Индикатор питания;
- Перфорированный корпус;
- Возможность регулирования выходного напряжений в пределах 24±5
- В.



Рис. 12. Блок питания (NES-150-24)

Характеристики:

- Входное напряжение – 90-132, 180-264 VAC;
- Номинальное выходное напряжение – 24 VDC;
- Количество выходов – 1;
- Ток – 6.5A;
- Мощность – 156 Ватт;
- Температурный диапазон -20 +60°C;

Регулятор мощности (MP303F) рис. 13, предназначен для регулирования мощности низковольтных (+12/24В) нагрузок постоянного тока (электродвигатели, лампы накаливания, светодиодные линейки и т.п.), тем самым существует возможность изменять частоту вращения электродвигателя. Благодаря использованию в схеме управления метода ШИМ (широтно-импульсная модуляция), подключенные к устройству электродвигатели могут устойчиво работать даже на малых оборотах, а при работе имеют меньший уровень шумов.



Рис. 13. Регулятор мощности (MP303F)

Характеристики:

- Напряжение питания постоянное – 12/24В;
- Напряжение нагрузки постоянное – 12/24В;
- Ток нагрузки макс. – 15А;

- Диапазон регулирования мощности – 0…100%;
- Размеры печатной платы – 83х46мм.

Счетчик импульсов универсальный рис. 14. Производит подсчет импульсов (оборотов) поступающих от индуктивного датчика и выводит показания на ЖКИ (LCD) дисплей.

Характеристики:

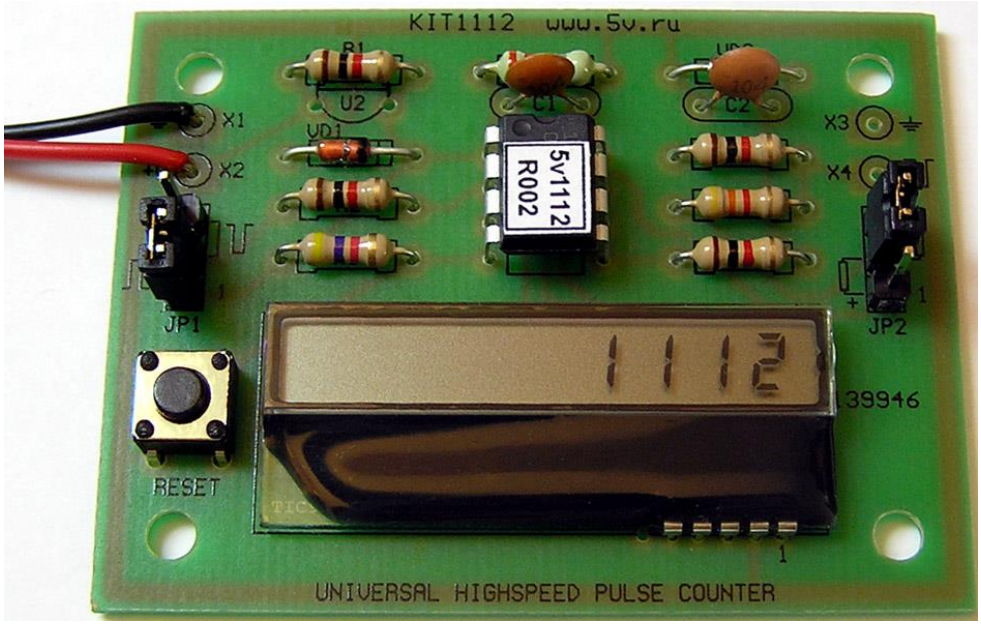


Рис. 14 – Счетчик импульсов универсальный

- Максимальная частота следования импульсов 30000 импульсов в секунду (30кГц);
- Диапазон счета от 0 до 999999999 (9 десятичных разрядов);
- Кнопка сброса показаний;
- Защита входа от выбросов амплитудой ±100В;
- Скорость обновления показаний индикатора более 50 раз в секунду;
- Напряжение питания – 24В;
- Потребляемый ток – 3мА;
- Габариты печатной платы – 32х15мм.

Индуктивный датчик, PNP, замыкающий, постоянное напряжение рис. 15. Необходим для регистрации совершаемых двигателем оборотов и выдачи импульсов на счетчик. При прохождении рядом с датчиком железного предмета размером сопоставимым с размерами датчика происходит замыкание, что служит импульсом для подсчета.

Характеристики:

- Расстояние срабатывания – 1.5мм;
- Гарантированный интервал срабатывания – 0…1.2мм;
- Ток нагрузки – 200 мА;
- Выходной ключ – PNP транзистор;
- Установка заподлицо – +;
- Максимальный потребляемый ток – 8мА;
- Частота срабатывания мах – 1.5кГц;
- Способ подключения кабель – 3х0.12мм кв.
- Масса – 60г.



Рис. 15. Индуктивный датчик

В роли металлического предмета выступает «маячок» 1, закрепленный на пластине из оргстекла 2, для закрепления на валу мотора использовано клеевое соединение «маячка» и втулки 3 закрепляемой винтом 4. В качестве противовеса служит аналогичная стальная пластина 5 (рис. 16).

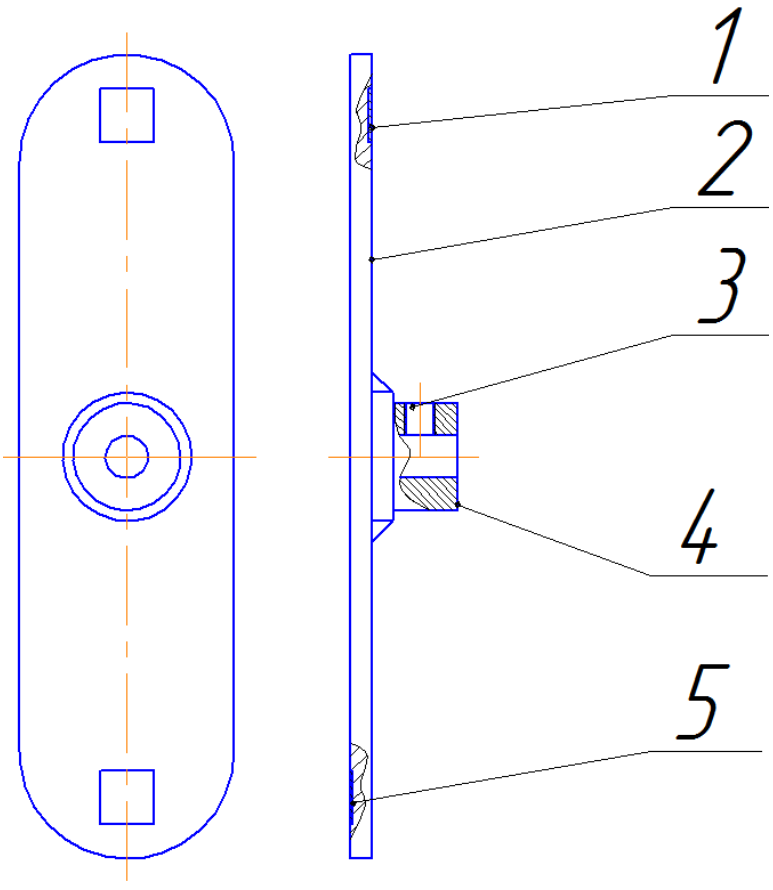


Рис. 16. «Маячок»

Патрон цанговый 4 мм рис. 17. Устанавливается на вал электромотора. Служит для закрепления проволоки.



Рис. 17. Патрон цанговый

Реле замыкающее рис. 18. Служит для отключения электромотора при обрыве проволоки.

Характеристики:

- Ток срабатывания не более – 90.9 мА;
- Номинальное рабочее напряжение – 5В;
- Контактный набор –1 замык;
- Максимальное коммутируемое постоянное напряжение –30В;
- Максимальный коммутируемый постоянный ток – 10А;
- Время срабатывания – 10мс;
- Время отпускания – 5мс;
- Наработка на отказ не менее – 10^6циклов;
- Рабочая температура – -30…85^{o}С.



Рис. 18. Реле замыкающее

На рис. 19 показана панель управления установкой. Назначение определенных элементов интуитивно понятно исходя из их названия. Передвижение платформы необходимо для смены лунки т.е. изменения напряжения испытания.

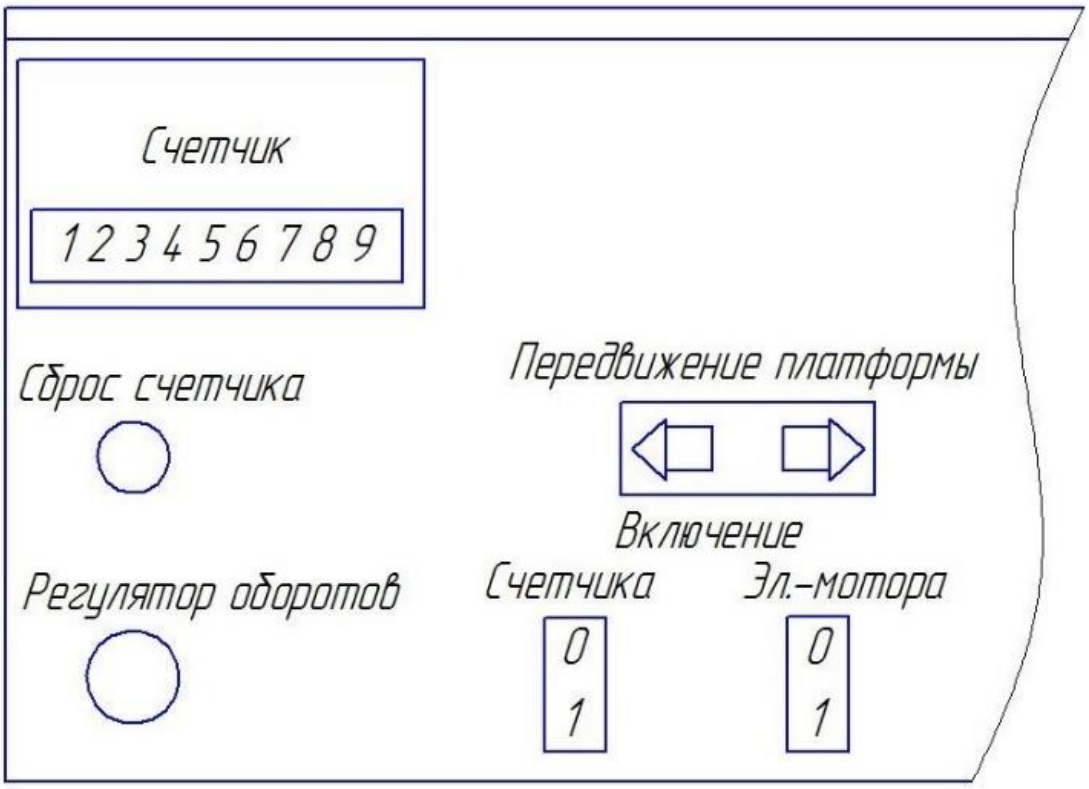


Рис. 19. Панель управления установкой

Схема установки представлена на рис. 20. Во вращательное движение проволоку приводит электродвигатель 1, закрепление проволоки обеспечивает цанговый патрон 2, для соединения в единое целое электродвигателя и направляющей платформы служит корпус установки из оргстекла 3, источником импульсов для подсчета оборотов служит индуктивный датчик 4, «маячок» 5 необходим для замыкания индуктивного датчика, для защиты от быстро вращающейся детали (до 5800об/мин) установлен кожух из оргстекла 6.

Для закрепления проволоки в определенном радиусе изгиба используется платформа с лунками 7, представляющая собой пластину из полиметилметакрилата в которой прорезаны пазы, в данные пазы укладывается проволока, сверху пазы закрываются другой пластиной огр. стекла и закрепляется болтами. Перемещение платформы обеспечивается механизмом 8, он состоит из направляющей и привода.

Для отключения установки при обрыве проволоки подается небольшое напряжение 5В на корпус эл-мотора с которого ток поступает на образец с которого уже на другом конце снимается электрический сигнал, он способствует замыканию реле включающее электродвигатель. При обрыве цепь размыкается и двигатель останавливается. У данного способа отключения есть недостатки, в настоящее время ведется работа по усовершенствованию или замене данного способа остановки испытания.

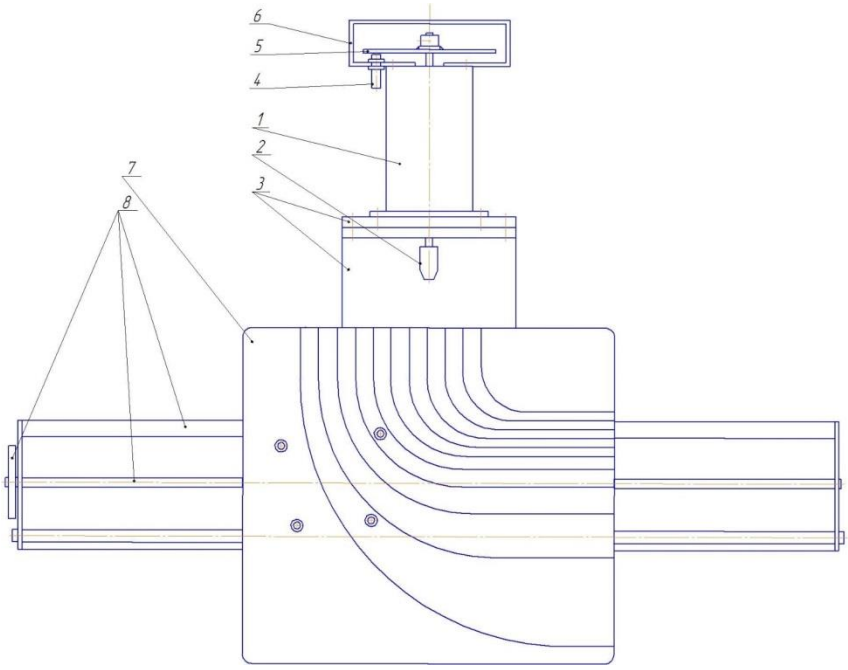


Рис. 20. Схема установки

В качестве модельного материала в работе применялась проволока из конструкционной углеродистой качественной стали 55 химического состава согласно ГОСТ 1050-88 (табл. 1).

Таблица 1. Содержание химических элементов, %

C	Si	Mn	Cr	S	P	Cu	Ni	As
0,595	0,18	0,40	0,25	0,040	0,035	0,25	0,25	0,08

Проволока получена волочением со степенью деформации (ε=99%). Диаметр проволоки ∅0,3мм. Данная проволока применяется для армировании автомобильных шин в составе металлокорда.

При разработке новых конструкций металлокорда существующих приемочных испытаний явно недостаточно, чтобы спрогнозировать его поведение в шинах. Испытания металлокорда в шинах являются очень продолжительными и дорогостоящими, что стимулирует появление более простых, ускоренных и дешевых методов оценки качества корда. Поэтому при определении эффективности новых конструкций и при отработке технологии изготовления уже известных типов металлокорда проводятся дополнительные тесты на металлокорде.

К таким характеристикам для металлокорда каркасных конструкций можно отнести:

- модуль упругости;
- выносливость как в обрезиненном, так и в необрезиненном состоянии;
- усилие анкеровки внутренних слоев, геометрическое расположение проволок и уровень компактности.

Каркасные конструкции металлокорда, по мнению конструкторов шин, должны обладать высоким модулем упругости, что позволяет более полно передавать тяговые и тормозные нагрузки от транспортного средства к поверхности дорог.

Для металлокорда брекерных слоев также важен показатель модуля упругости, но в качестве составляющей изгибной жесткости. Показатель изгибной жесткости в брекерных слоях шин определяет ходимость шин, уровень сопротивления качению, совместно с

величиной разрывного усилия - вес шин. Высокий модуль упругости стали в сочетании с большими диаметрами проволок позволяет обеспечивать необходимую жесткость брекерного слоя и по возможности уменьшать количество слоев в шине.

В настоящее время проводятся испытания данной проволоки. Результаты сравниваются с ранее полученными на предыдущем варианте установки. В дальнейшем планируется расширить круг используемых материалов. Планируется провести испытания на материале нитинол.

Еще возможно испытание проволоки на усталость данным методом применяемой для изготовления стентов рис. 21. Стенты – это металлические каркасики (маленькие металлические трубочки) с ажурным, сетчатым строением стенки. Основным материалом для их изготовления на сегодняшний день служит нержавеющая сталь, а также сплавы на основе нитинола и тантала.

Стенты располагаются на баллонах, что позволяет им в нераскрытом состоянии иметь совсем небольшие размеры, а после раздувания баллона внутри коронарной артерии расширяться, оставаясь в таком положении навсегда [6].

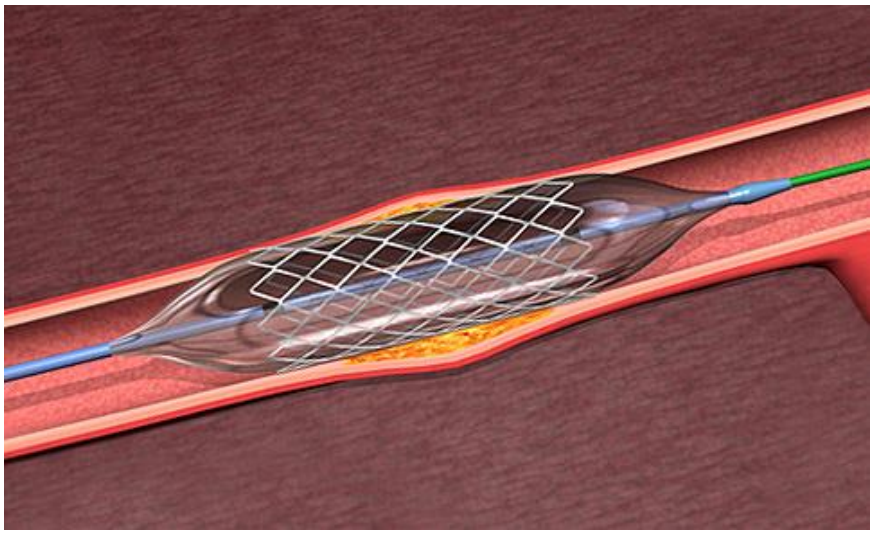


Рис. 2. Стент в кровеносном сосуде

Также проволоку работающую в подобных условиях можно увидеть в технических щетках рис. 22.

Данные щетки применяются для для зачистки заусенцев (с отверстием, неплетеные), используемые на стационарных шлифовальных машинах, доступны также в исполнении «LIT» со скрученным и латунированным литцендратом. Благодаря этому они также подходят для тяжелых работ, например, для снятия заусенцев с обрезных кромок; дисковые щетки с хвостовиком (неплетеные) дополнены сверхузкими исполнениями, которые в особенности подходят не только для обработки труднодоступных мест, но и для предельно точной работы; щетки в исполнении INOX-TOTAL из высококачественной стали (INOX) выполнена не только рабочая часть, но и все остальные детали (INOX). Они изготовлены из стали марки 1.4310 (V2A), что надежно защищает заготовку от коррозии. Поставляемые щетки INOX-TOTAL имеют распространенный тип конструкции и исполнения; тарельчатые щетки имеют рабочую часть с содержанием SiC и используются для обработки поверхностей и выполнения работ по устранению заусенцев на стационарных машинах.

Фирма «PFERD» предлагает тарельчатые щетки с различными видами зернистости; плетение COMBITWIST доступно также и для чашечных щеток с резьбой (плетеных) без опорного кольца. Эти агрессивные щетки отлично подходят для выполнения тяжелых работ на поверхностях, например, для удаления ржавчины и очистки [7].



Рис. 22. Дисковая не плетенная и плетеная щетка

Литература

1. Терентьев В.Ф., Циклическая прочность металлических материалов, Новосибирск: НГТУ, 2001.
2. И. Березин, Усталостное разрушение металлов и расчеты на прочность и долговечность при переменных напряжениях, Челябинск: ЮУрГУ, 2002.
3. Instron, «Испытание на усталость и разрушение арматурной проволоки для шин,» [В Интернете]. Available: http://www.instron.ru/wa/solutions/Tire_Reinforcing_Wire.aspx. [Дата обращения: 2013].
4. Instron, «Циклические испытания на растяжение нитиноловой проволоки,» [В Интернете]. Available: http://www.instron.ru/wa/solutions/details.aspx?PageID=1702. [Дата обращения: 2013].
5. В. Геминов, «Установка для усталостных испытаний тонких проволок». Россия Патент 2163716.
6. «СТЕНТЫ – РАЗНОВИДНОСТИ,» [В Интернете]. Available: http://www.ichilov.net/heartsurgery/Stentsvarieties/. [Дата обращения: 2014].
7. Pferd, «Технические щетки,» [В Интернете]. Available: http://www.pferd.com/ru-ru/244_RUS_HTML.htm. [Дата обращения: 2014].

УДК 621.791

ВЛИЯНИЕ НАНОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ СОЕДИНЕНИЙ ТИТАНА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА

Александр Александрович Силкин,
студент 5 курса,
кафедра «Материаловедение»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Ю.А. Курганова,
доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение»

Введение

В связи с активным освоением природных ресурсов в районах Крайнего Севера РФ и техническим оснащением добывающей промышленности (производство сварных резервуаров, трубопроводов и других агрегатов и сварных конструкций ответственного назначения) повышение качества соответствующих изделий отечественного производства представляет актуальную задачу. Наиболее опасными с точки зрения эксплуатационной пригодности являются сварные соединения ответственных изделий, которые должны отвечать ряду требований, регламентируемых нормативно технической документацией (НТД). Одной из основных проблем, регламентирующих качество изделий, является обеспечение требований по структуре и механическим свойствам, в том числе ударной вязкости сварного шва и околошовной зоны. В настоящее время разрабатываются различные технологии обеспечения заданного уровня требований к рассматриваемой категории изделий. Одним из современных перспективных механизмов формирования заданного уровня свойств является введение нанодисперсных порошков в зону сварного соединения [1-3]. В связи с чем, **целью работы** явилось определение влияния нанодисперсных частиц TiN, TiCN, WC (<100 нм) на изменение структуры и свойств металла шва и околошовной зоны.

Методика проведения исследований

Исследования проводили при сварке пластин из углеродистой стали обыкновенного качества Ст3 (ГОСТ 380—2005), толщиной 10 мм, с V-образной разделкой кромок (угол разделки кромок - $35°_{-5°}$, притупление кромок - (1,8+0,8) мм). Вид пластины представлен на рисунке 1.

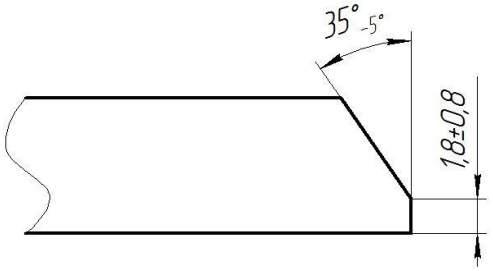


Рис.1. Вид пластины

Сварку производили встык на подкладной ленте марки ЛМС по ТУ 6-48-00204961-12-90 за один проход автоматической дуговой сваркой под флюсом марки 761 (производства Lincoln Electric) двумя проволочными электродами (проволока сварочная сплошного сечения состава 0,05...0,15 % C, 0,8...1,25 % Mn, 0,1...0,35 % Si) диаметром 4 мм. Расстояние между электродами - 27 мм, а скорость сварки — 26 м/ч. Схема сварки представлена на рисунке 2.

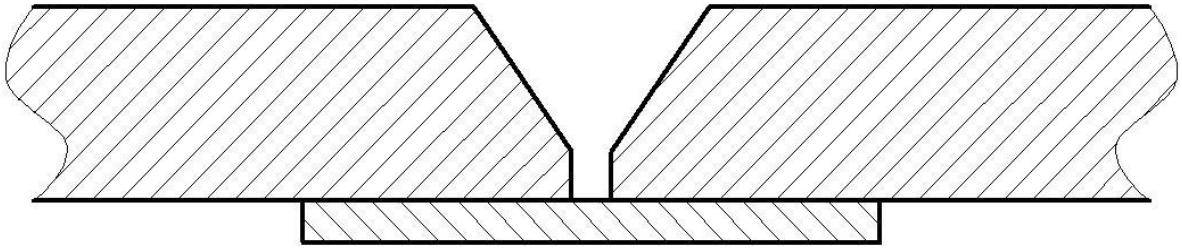


Рис.2. Схема сварки

Для оценки влияния модифицирующих компонентов на структуру и свойства металла шва проводили сварку с введением порошков в расплав сварочной ванны в количестве 0,14 мас. %. Нанодисперсные порошки TiN, TiCN и WC вводили в составе композиционных гранул, которые предварительно засыпали в разделку кромок. Композиционные гранулы предоставлены Лабораторией плазменных процессов в металлургии и обработке металлов (№ 16) ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН и представляют собой порошок никеля с внедренными в него 20 мас.% нанодисперсными порошками.

В ходе работы были проведены исследования химического состава и микроструктуры, измерения твердости сварного шва и околошовной зоны, анализ результатов испытаний ударной вязкости и исследование поверхностей изломов.

Анализ химического состава выполнен на базе оборудования предприятия ОАО «НИИхиммаш», рентгено-флуоресцентным спектрометром X-MET 5100 с поэлементным методом определения.

Металлографические исследования микроструктуры проводили на микрошлифах. Приготовление шлифов проводили с использованием шлифовального станка MoPao 960 Dual Speed Grinder Polisher и Struers Tegramin-25. Травление выполнялось 5% раствором азотной кислоты в этиловом спирте. Микроструктуру наплавленных покрытий исследовали на оптическом микроскопе 4XC-HYV и Olympus GX51 с использованием программы для анализа изображений. Для проведения исследования использовалось увеличение x400 и x500.

Измерения твердости по Виккерсу (5HV) сварного шва и околошовной зоны проводили на универсальном приборе Emco Test Dura Scan вдавливанием индентора при нагрузке 50 Н.

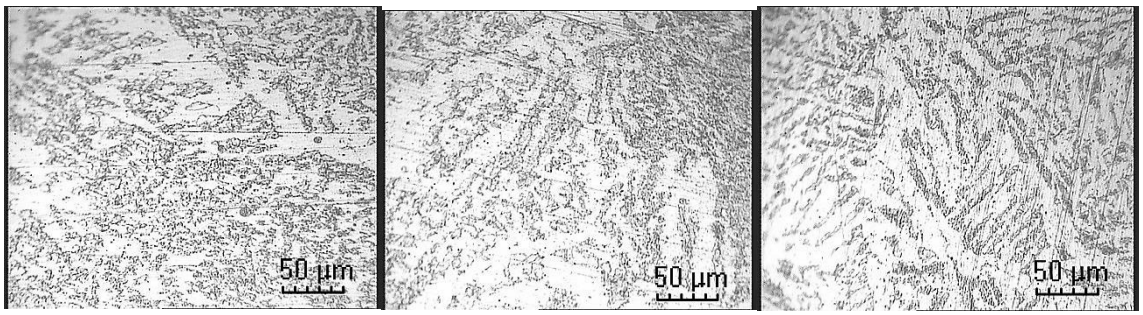
Ударную вязкость определяли испытаниями по методу Шарпи (KCV) на образцах типа IX (ГОСТ 6996—66) при температуре - 20°С.

Поверхности разрушения после испытаний на ударную вязкость исследовали на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-T330A. Для проведения исследования использовали увеличение x750.

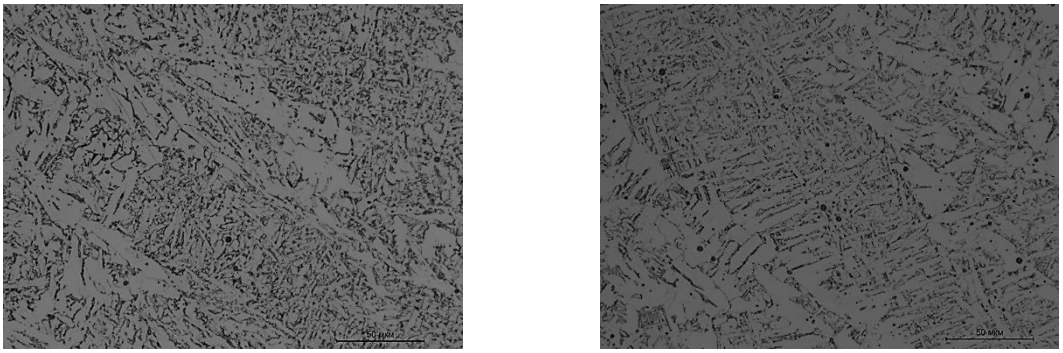
Результаты и анализ проведенных исследований

На выбранных режимах с использованием подкладных лент удалось получить сварные соединения с удовлетворительным формированием лицевой и обратной сторон. Согласно литературным данным [4], при автоматической дуговой сварке под флюсом низкоуглеродистых сталей с применением низколегированной присадочной проволоки микроструктуру металла шва характеризуют как состоящую из феррита и перлита.

При металлографическом анализе образцов соединений с добавлением нанодисперсных порошков TiN, TiCN, WC, Ni и без засыпки композиционных гранул, видно, что структура металла шва имеет строгую столбчатую направленность кристаллов, характерную для сварного шва. В ней присутствуют ферритная и перлитная составляющие (рис. 3).



а (х400) б (х400) в (х400)



г (х500) д (х500)

Рис. 3. Микроструктура шва, выполненного двухдуговой сваркой под флюсом, без предварительной засыпки порошков (а) и с предварительной засыпкой порошков TiCN (б), TiN (в), Ni (г), WC(д)

Предварительное введение композиционных гранул в зону сварки не вносит существенных изменений в набор морфологических форм структурно-фазовых составляющих металла шва. Наблюдения показали качественное измельчение структуры. Вследствие уменьшения величины размеров зерен структура металла становится более равномерной (рис. 3, б, в, г, д).

Результаты исследования химического состава металла шва представлены в таблице 1.

Таблица 1. Поэлементный химический состав металла шва исследуемых образцов

Образец	Содержание элемента, %					
	Fe	Ni	Ti	Si	Mn	Cr
Без модификатора	>89,79	<0,07	0,02	0,14	0,61	<0,08
с наполнением TiN	>89,61	0,24	0,01	0,16	0,65	<0,07
с наполнением TiCN	>89,73	0,18	0,01	0,16	0,60	<0,09
с наполнением WC	>89,70	0,20	0,02	0,16	0,63	<0,07
с наполнением Ni	>89,69	1, 38	0,01	0,16	0,60	<0,08

По результатам исследований химического состава металла шва, можно заключить, что химический состав металла шва соотносится с ожидаемым теоретическим результатом. В образцах с модификатором наблюдается наличие небольшого количества Ni. Содержание Cr и Ti находится в пределах погрешности прибора.

Результаты исследования твёрдости представлены в таблице 2, расположение точек проведения замеров соответствует рис. 4. Распределение твёрдости показано на рис. 5 и 6.

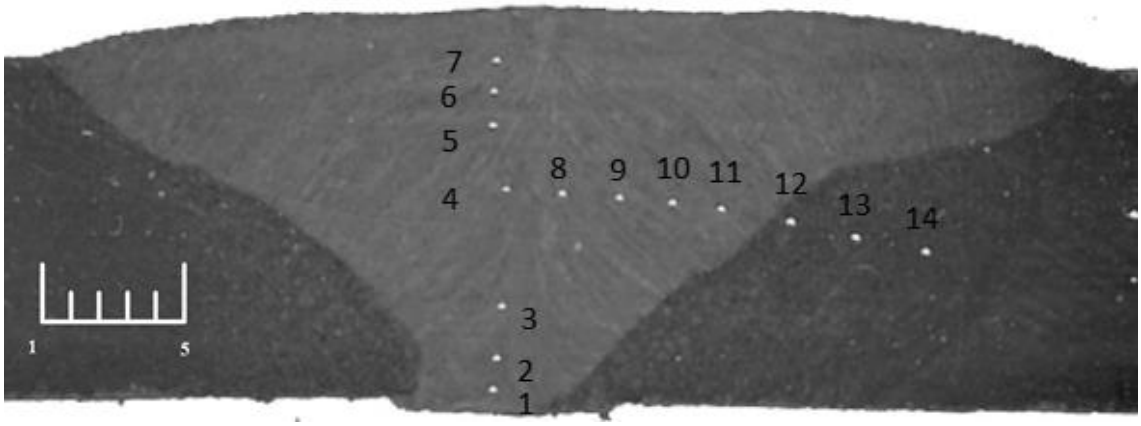


Рис. 4. Макроструктура шва, выполненного двухдуговой сваркой под флюсом с предварительной засыпкой порошков

Таблица 2. Твёрдость металла шва

	Твёрдость $HV \cdot 10^{-1}$, МПа				
Модификатор / Точка измерений	б/м	Ni	TiN	TiCN	WC
1	160	169	164	179	196
2	150	178	156	171	202
3	152	177	161	173	208
4	151	182	160	169	191
5	151	187	158	169	189
6	154	195	164	172	193
7	153	191	151	175	190
8	155	182	161	168	183
9	160	182	155	172	190
10	154	182	159	176	187
11	152	180	153	171	182
12	166	147	156	180	153
13	162	139	163	159	148
14	149	140	152	152	140

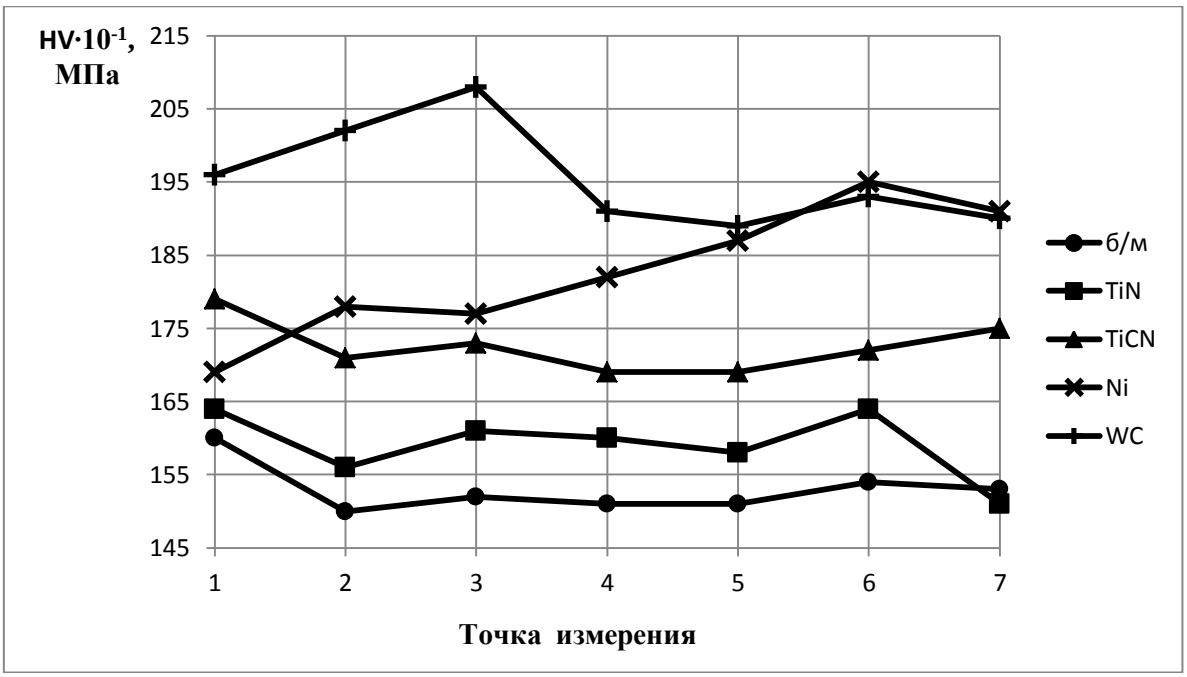


Рис.5. Распределение твёрдости металла шва по высоте

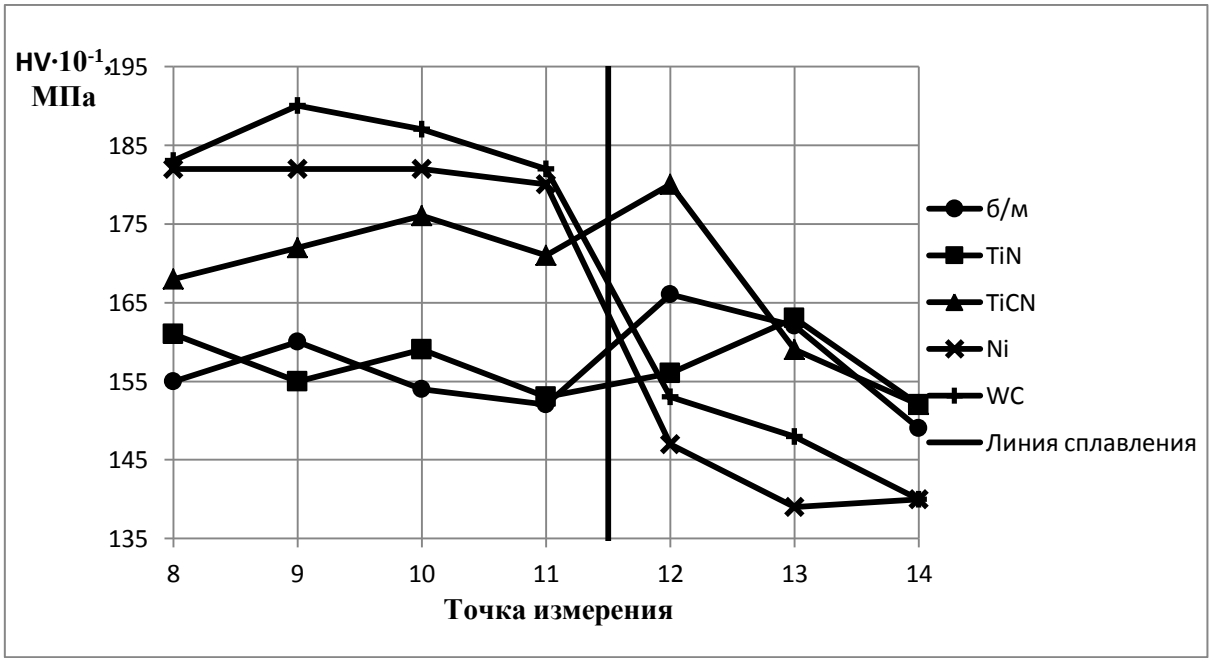
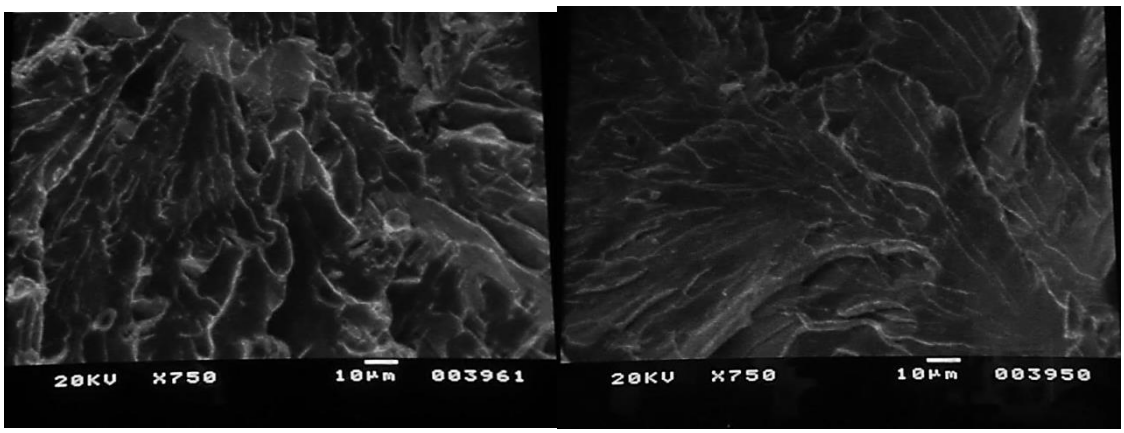


Рис.6. Распределение твёрдости металла шва по сечению

Введение композиционных гранул, содержащих наноразмерные частицы TiCN (<100нм), способствует увеличению твёрдости металла шва в среднем на 18HV, что составляет 12%. В случае гранул, содержащих частицы TiN(<100нм), прирост твёрдости металла шва менее значителен и составляет 3% . Введение композиционных гранул, содержащих наноразмерные частицы WC (<100нм), способствует увеличению твёрдости металла шва в среднем на 38HV, что составляет 27%. В случае гранул, не содержащих наноразмерные частицы, прирост твёрдости металла шва составляет 20% .

Сравнительный анализ структуры поверхности образцов после проведения испытаний на ударную вязкость с введением нанодисперсных частиц и без них представлен на рис. 7.



(а) (б)

Рис. 7. Поверхности разрушения после испытаний на ударный изгиб (а – без засыпки порошка, б – с введением композиционных гранул, содержащих наноразмерные частицы TiCN)

Наличие фасеток квазискола свидетельствует о преобладании хрупкой составляющей в механизме разрушения. Разрушение образца с модификатором, содержащим частицы TiCN(<100нм) можно оценить, как более вязкое по отношению к образцу без модификатора (рис 7).

Результаты проведения испытаний на ударную вязкость образцов представлены в таблице 3.

Таблица 3. Ударная вязкость (KCV) металла шва (температура испытаний – - 20°С)

Модификатор	KCV, кДж/м^2
без модификатора	50
TiCN	54
TiN	47

Обработка данных показала, что введение композиционных гранул, содержащих наноразмерные частицы TiN(<100нм) привело к снижению ударной вязкости на 6% (47кДж/м^2 вместо 50кДж/м^2). Введение композиционных гранул, содержащих наноразмерные частицы TiCN (<100нм), привело к увеличению величины ударной вязкости металла шва на 8% (54 кДж/м^2 вместо 50 кДж/м^2), что положительно сказывается на эксплуатационных характеристиках.

Выводы

1. Введение композиционных гранул, содержащих наноразмерные частицы TiN(<100нм), TiCN(<100нм), WC(<100нм) в зону сварки не вносит существенных изменений в набор морфологических форм структурно-фазовых составляющих металла шва. Однако вследствие уменьшения размера перлитных и ферритных зерен структура становится более равномерной.

2. Введение композиционных гранул, содержащих наноразмерные частицы TiCN (<100нм), способствует увеличению твёрдости металла шва в среднем на 12%. При этом разрушение образца с введением частиц TiCN(<100нм) при ударных нагрузках может быть оценено по отношению к немодифицированному образцу, как более вязкое. В случае гранул, содержащих частицы TiN(<100нм), прирост твёрдости металла шва менее значителен и составляет 3%. Наиболее значительное увеличение твёрдости наблюдается в образцах, модифицированных WC(<100нм), и составляет 27%. В случае гранул Ni, не содержащих наноразмерные частицы, прирост твёрдости металла шва составляет 20% .

3. Испытания механических свойств при температуре - 20°С демонстрируют прирост ударной вязкости на 8% (54 кДж/м^2 вместо 50 кДж/м^2) для образцов, модифицированных композиционными гранулами, содержащих наноразмерные частицы TiCN(<100нм), что положительно сказывается на эксплуатационных характеристиках.

Введение композиционных гранул, содержащих наноразмерные частицы TiN(<100нм) привело к снижению ударной вязкости на 6% (47кДж/м^2 вместо 50кДж/м^2).

Таким образом, влияние карбонитридов вносит определенные изменения в структуру и свойства исследуемого сварного соединения, главным образом выраженное в понижении хрупкости шва и околошовной зоны.

Литература

1. Модифицирование структуры наплавленного металла нанодисперсными карбидами вольфрама /*Г.Н. Соколов, А.С. Трошков, В.И. Лысак и др*. // Физика и химия обработки материалов. − 2009. − № 6. − С 41-47.
2. Влияние нанодисперсных карбидов W и никеля на структуру и свойства наплавленного металла / *Г.Н. Соколов, А.С. Трошков, В.И. Лысак и др.* //Сварка и Диагностика. − 2011. − №3. − С.36-38.
3. Влияние наноразмерных порошков карбида вольфрама на структуру и свойства металла шва / *А.А. Линник, А.С. Панкратов, Н.В. Коберник*// Машиностроение. – 2013. - №6. – С.66-71.
4. *Хорн Ф.* Атлас структур сварных соединений: Пер. с нем. М.: Металлургия, 1977. 288с.

УДК 62-4

СЕЛЕКТИВНОЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЕ ПЛАВЛЕНИЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6

Ненад Драганович Симич-Лафицкий,
студент 5 курса,
кафедра «Материаловедение»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: К.О. Базалеева,
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Материаловедение»

Введение

В настоящее время большой интерес представляют технологии лазерной перекристаллизации порошковых материалов. Эти технологии дают возможность создавать детали сложной формы за счет 3d-компактирования, а также формировать изделия с градиентом пористости, изменяя технологические параметры процесса. Данные методы позволяют создавать детали достаточно больших размеров за короткое время, а высокие скорости охлаждения приводят к образованию структур, обладающих хорошими прочностными свойствами. В данной работе было проведено исследование структуры и свойств титанового сплава ВТ6 после электронно-лучевой перекристаллизации.

Материалы и методики

В данной работе электронно-лучевой перекристаллизации подвергался порошок титанового сплава ВТ-6, химический состав которого представлен в таблице 1. Размер частиц в исходном порошке составлял от 45 до 100 мкм. Нижний предел размера частиц (45 мкм) обеспечивает нормальный режим работы установки: частицы меньшего размера разлетаются по камере, попадая на катод.

Таблица 1 Химический состав сплава

Концентрация элементов, масс.%		
Al	Ti	V

4.4±0,1	90.3±0,1	5.3±0,1

В ЭЛП методе источником электронов является термоэмиссионный вольфрамовый катод. Электроны ускоряются разностью потенциалов 60 кВ и фокусируются на поверхности порошка в пятно, диаметр которого в зависимости от мощности электронного пучка варьируется от 0,2 до 1 мм, а мощность электронного пучка в свою очередь зависит от тока катода. При воздействии электронного пучка на порошковый материал он полностью переплавляется и при остывании заново кристаллизуется. Перемещение электронного пучка по поверхности порошкового материала осуществляется с помощью системы электромагнитных линз в соответствии с программой, что позволяет сформировать профиль любой формы. Первый слой объекта формируется на подложке из нержавеющей стали, которая расфокусированным электронным лучом разогревается до 760 °С. Перед нанесением каждого следующего слоя порошка предыдущий также разогревается пучком электронов.

В данной работе для проведения процесса ЭЛП использовалась установка ARCAM A2. Схема установки приведена на рисунке 1. При формировании объекта скорость сканирования электронного пучка по поверхности порошка составляла 8 000 м/с. Данный метод позволяет задать размер объекта с точностью до 0.2 мм, поверхность имеет среднюю шероховатость порядка 35 мкм.

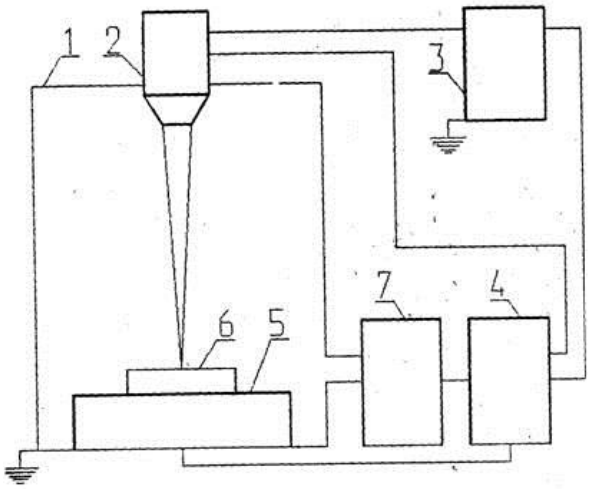


Рис. 1. Схема метода электронно-лучевого плавления: 1 - вакуумная камера; 2 - электронная пушка; 3 - высоковольтный выпрямитель; 4 - пульт управления; 5 - механизм перемещения обрабатываемого изделия; 6 -обрабатываемое изделие

Структура титанового сплава, полученная ЭЛП методом, исследовалась с помощью металлографического анализа, растровой электронной микроскопии. Методом рентгеноструктурного анализа определялся фазовый состав сплава, параметр решетки α- и β-Ti и физическое уширение рентгеновских линий. Механические характеристики сплава определялись при испытании на растяжение и при измерении значения микротвердости. Электрохимическое поведение сплава оценивалось по току коррозии.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 2 представлена металлографическая структура сплава ВТ6, полученного методом электронно-лучевого плавления. Из фотографии, полученной при увеличении 100, хорошо виден столбчатый характер формируемой структуры: ориентировка структуры совпадает с направлением теплоотвода при процессе формирования объекта. Наблюдаемая структура напоминает классическую видманштеттовую структуру, характерную для титановых α+β–сплавов. По границам

первичного β–зерна выделяется светлая каемка α–фазы, а далее β–фаза распадается на переплетенные в виде корзинки α и β кристаллы равновесного состава.



а б в

Рис.2. Структура сплава ВТ6, полученная методом ЭЛП при увеличении 100 (а), 200 (б) и 500 (в), соответственно

Методом рентгеноструктурного анализа был исследован образец, полученный методом СЭЛП, в двух сечениях – продольном и поперечном. Было подтверждено наличие α и β фазы в структуре сплава. Также рассчитаны параметры решетки (гексогональная плотноупакованная) α-фазы a=2.9225 А, c=4.6712 А, тетрагональность c/a для α-фазы равна 1,6. Для β-фазы параметр решетки (ОЦК) a=3,2101 А. По результатам количественного фазового анализа процентное содержание β-фазы равно 8%, а α-фазы − 92%.

На рисунке 3 приведена деформационная кривая для сплава ВТ6, полученного методом ЭЛП, а в таблице 2 приведены механические характеристики сплава, полученные при обработке деформационной кривой. В таблице 3 приведены соответствующие характеристики для сплава ВТ6, подвергнутого стандартным обработкам: отжигу и закалке со старением [1]. Из таблиц видно, что уровень свойств, который демонстрирует сплав после ЭЛМ, сопоставим с уровнем свойств отожженного сплава.

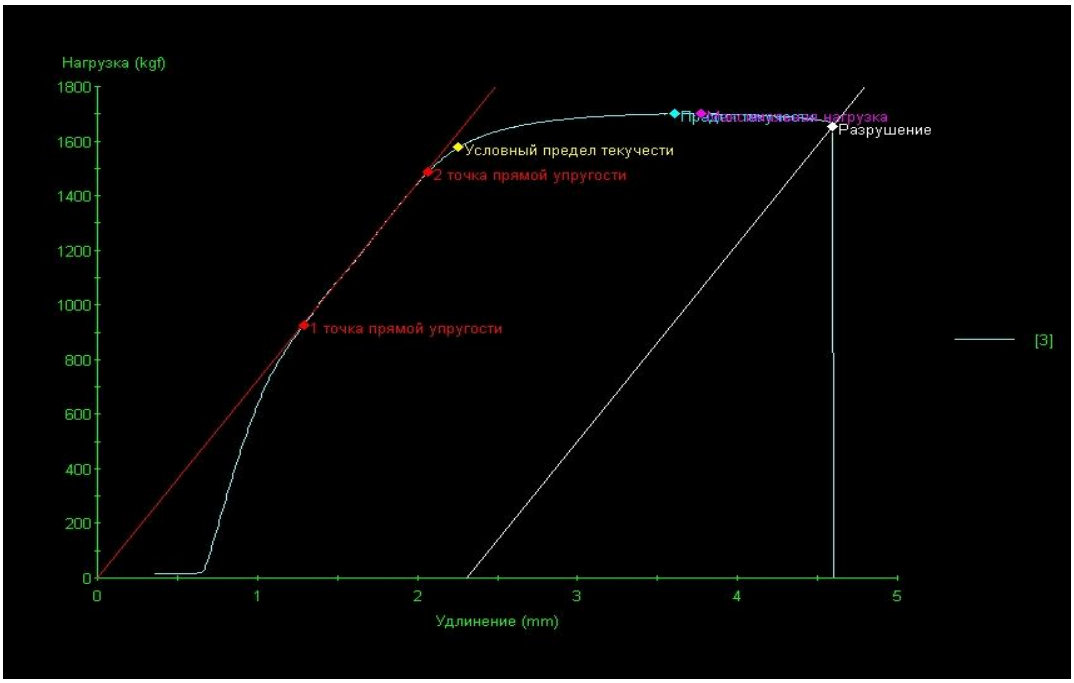


Рис. 3. Кривая растяжения сплава ВТ6, полученного методом ЭЛП

Кроме того, были произведены измерения микротвердости исследуемого сплава на поверхности и в сердцевине. Оказалось, что значение микротвердости одинаково на поверхности и в сердцевине сплава и составляет примерно 360 $HV_{0.025}$. Из таблице 4

видно, что это значение микротвердости соответствует верхнему пределу значений для сплава в закаленном и состаренном состоянии.

Таблица 2. Механические характеристики сплава ВТ6, полученного методом СЭЛП

Образец №	Предел прочности, МПа	Условный предел текучести, МПа	Относительное удлинение , %	Относительное сужение, %
1	803	733	10,1	5,6
2	750	694	7,5	7,0
3	780	723	8,8	6,9

Таблица 3. Механические свойства материала ВТ6 при Т=20ºС

Сортамент	Предел прочнос-ти, МПа	Относитель-ное удлинение, %	Относитель-ное сужение, %	KCU, кДж/м^2	Термообра-ботка	Твер-дость, НВ
Пруток, ГОСТ 26492-85	835-885	6-8	15-20	250	Отжиг	255-341
Пруток, ГОСТ 26492-85	1080	4	12	200	Закалка и старение	293-361

Также были проведены испытания на коррозионную стойкость сплава после ЭЛП: определялся ток коррозии. По результатам испытаний было определено, что титановый сплав ВТ6, полученный методом СЭЛП не корродирует в 5% растворе NaCl. На рисунке 4 приведены кривые общей коррозии для эталонного образца, полученного методом горячей прокатки с последующим отжигом в вакууме, и образца, полученного методом СЭЛП.

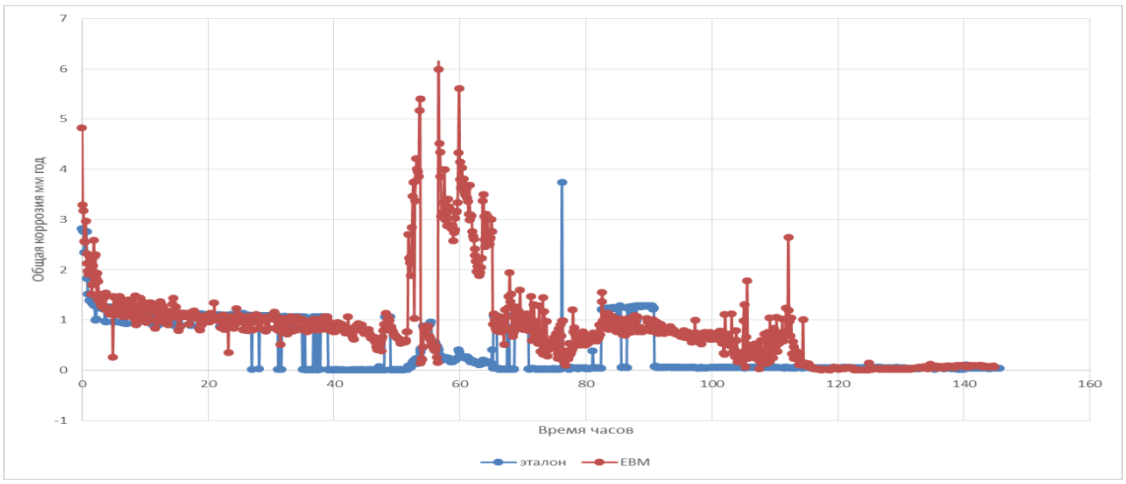


Рис. 4. Кривая общей коррозии по времени

Также были проведены испытания на питтинговую коррозию. На рисунке 5 приведены кривые питтинговой коррозии по времени для эталона и образца, полученного методом СЭЛП.

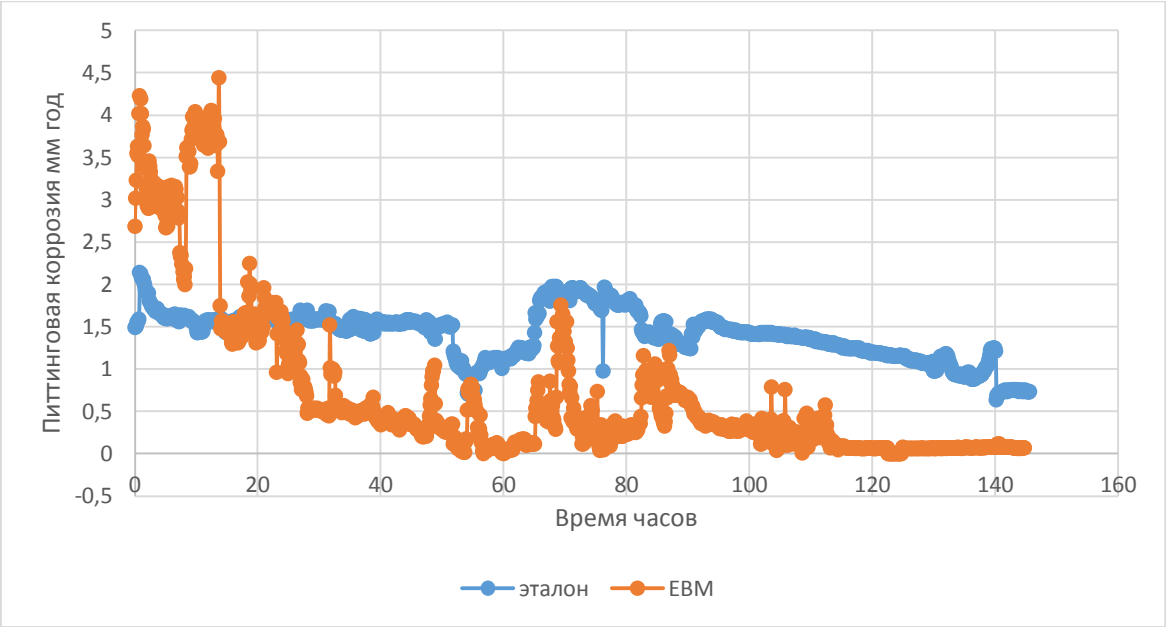


Рис.5 Скорость питтинговой коррозии для эталона и образца, полученного методом СЭЛП

Из графиков общей и питтинговой коррозии для эталона и исследуемого образца видно, что сплав полученный методом СЭЛП обладает большей стойкостью к питтинговой коррозии, а сопротивление общей коррозии практически одинаково с эталоном.

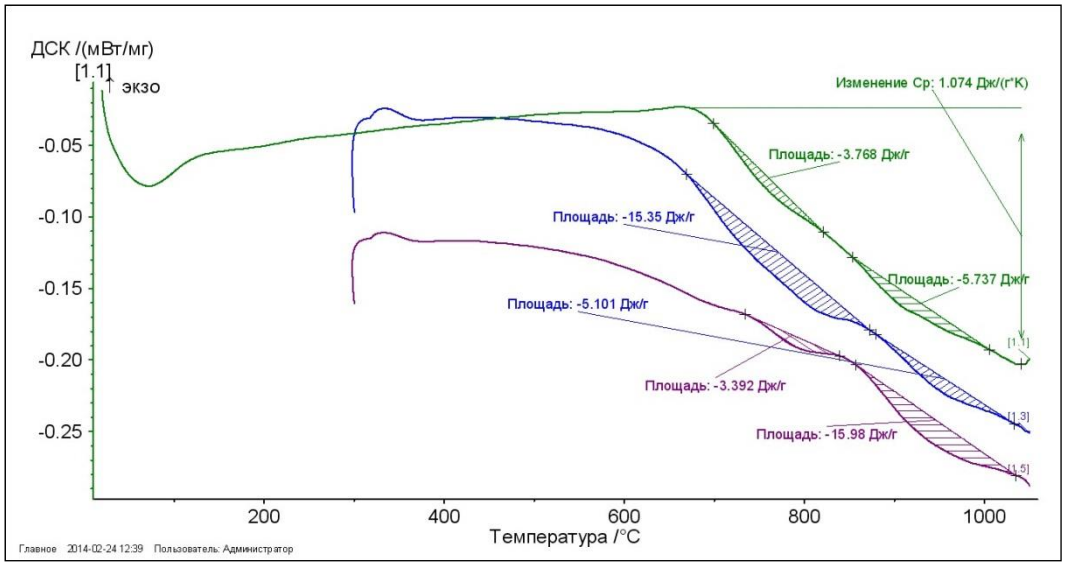


Рис. 6. Кривые ДСК образца из титанового сплава ВТ6, полученного методом СЭЛП, участок нагрева до температуры 1050°С

Для сравнения фазово-структурных превращений в сплаве после СЭЛП и эталонном образце был проведен термоанализ методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Эталонный образец изготовлен методом горячей прокатки и впоследствии отожжен при температуре 950ºС в течение 2 часов. На рисунке 6 приведены кривые ДСК для исследуемого образца при нагреве до температуры 1050°С. Нагрев образца проводился трижды. На рисунке 6 зеленым цветом показан первый нагрев, синим и фиолетовым цветом второй и третий нагрев, соответственно. Мы видим, что на всех трех участках есть две отдельных эндотермических реакции, которые могут соответствовать полиморфному превращению α-фазы в β-фазу. Предположительно, полиморфное α→β−превращение может быть разделено на два интервала, потому что

превращение α-кристаллов, расположенных по границам β-зерен и внутри их зерен протекает при разных температурах. На рисунке показано изменение теплоемкости образца в интервале от 600°С до 1000°С при первом нагреве. Однако на кривых охлаждения мы не можем точно зафиксировать превращение (см. рис.7).

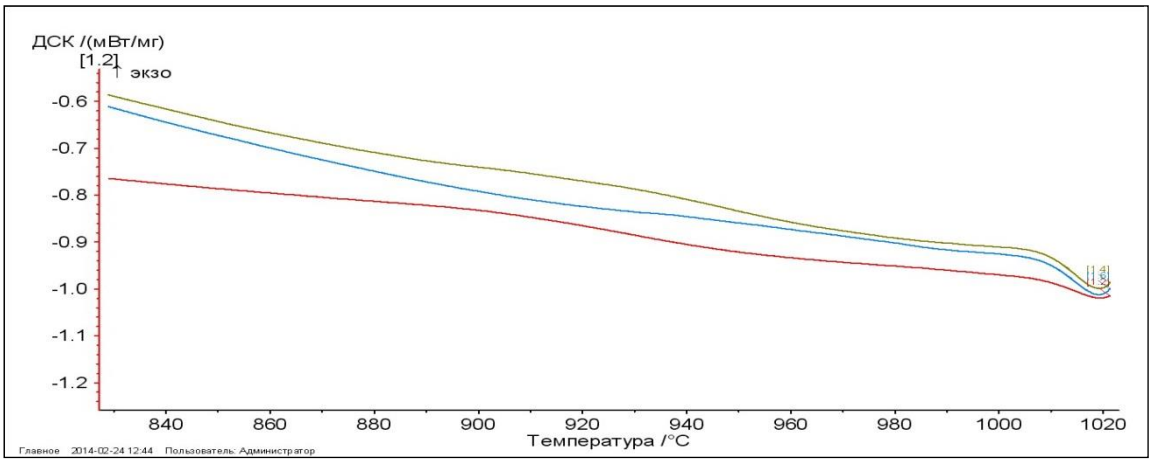


Рис. 7. Кривые ДСК образца из титанового сплава ВТ6, полученного методом СЭЛП, три участка охлаждения

На рисунке 8 мы видим активное выделение тепла в интервале температур 500°С - 900°С. Исходя из того, что образец был полостью отожжен и не имеет остаточных напряжений и принимая во внимание тот факт, что при втором и третьем нагреве отсутствуют экзотермические эффекты, мы предполагаем, что данное выделение энергии связано с реакцией окисления поверхности. При втором нагреве окисление не идет дальше, из-за образовавшейся на поверхности оксидной пленки.

Сравнивая кривые ДСК (участки нагрева) эталонного образца и образца, полученного методом СЭЛП, мы можем сделать вывод о том, что исследуемый образец обладает большей жаростойкостью по сравнению с эталоном. Кроме того, следует отметить, что после термических испытаний эталонный образец был покрыт черной пленкой, тогда как образец, полученный методом СЭЛП, имел темно синий оттенок.

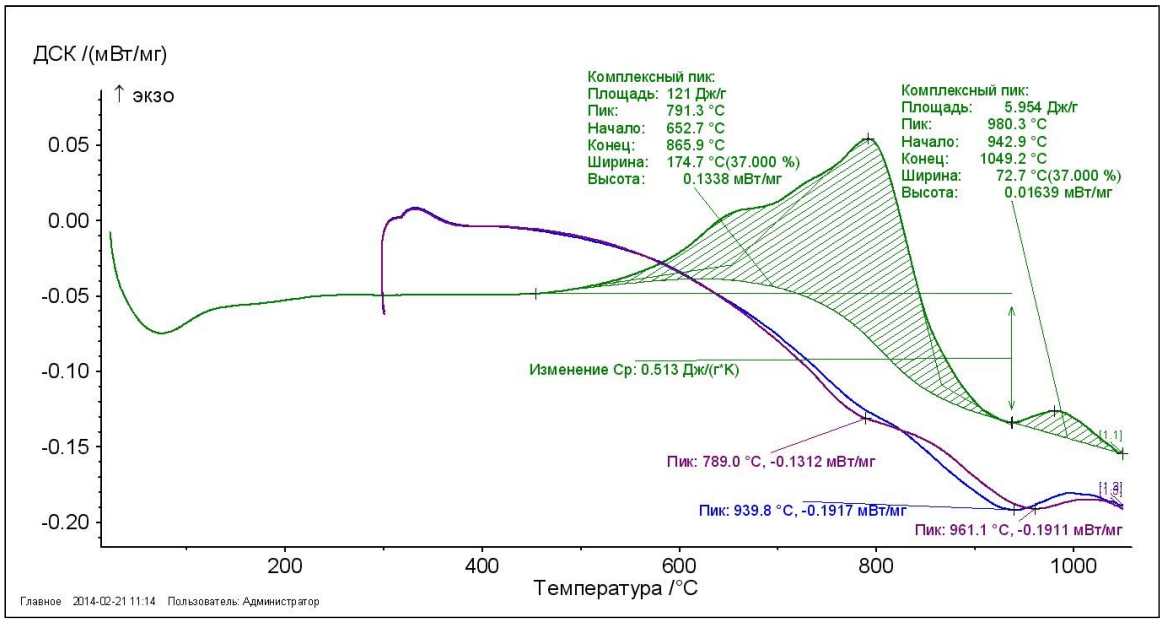


Рис. 8 Кривые ДСК эталона, 3-и участка нагрева до 1050°С

Заключение

Исследованы структура и свойства титанового сплава ВТ6 после электронно-лучевого плавления. Показано, что в структуре сплава присутствуют две фазы: α и β. Установлено, что сплав обладает высокой твердостью (360 $HV_{0.025}$), а предел прочности и относительное удлинение близки к значениям, характерным для сплава в отожженном состоянии. Скорость общей коррозии в исследуемом сплаве составляет 0,007 мкм/год. Так же скорость питтинговой коррозии меньше у образцов, полученных методом СЭЛП. Сплав термо-динамически стабилен до температур 500 ºС – 550 ºС и имеет два эндотермических превращения при высоких температурах соответствующие фазовому переходу α-фазы в β-фазу.

Литература

1. *Ильин А.А., Колачёв Б.А., Полькин И.С.* «Титановые сплавы. Состав, структура, свойства», ВИЛС - МАТИ, 2009. - 520 с.

2. *Вульф Б.К.* «Термическая обработка титановых сплавов», металлургия, 1969. - 376 с.

3. *Аношкин Н.Ф.* (ред.) «Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов», металлургия, 1980. – 464с.

4. Пер. с англ. *С.Г. Глазунова* «Порошковая металлургия титановых сплавов», металлургия, 1985. — 263 с.

УДК 669.018.9

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АРМИРУЮЩЕЙ ФАЗЫ НА ТВРЕДОСТЬ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Юлия Александровна Лопатина,
студентка 4 курса,
кафедра «Материаловедение»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Курганова Юлия Анатольевна,
доктор наук, доцент, профессор кафедры «Материаловедение»

Комбинирование различных веществ остается сегодня одним из основных способов создания новых материалов. Каждый из составляющих имеет свое конкретное назначение применительно к рассматриваемому готовому изделию. Совместная работа разнородных компонентов дает эффект, равносильный созданию нового материала, свойства которого количественно и качественно отличаются от свойств каждого из составляющих. Такие сложные материалы, в состав которых входят сильно отличающиеся по свойствам нерастворимые один в другом компоненты, разделённые ярко выраженной границей, называются *композиционными материалами*.

Во всех композиционных материалах четко различают два основных функциональных компонента. Один из компонентов, обладающий непрерывностью по всему объему, является *матрицей*; компонент прерывный, разделенный в объеме композиции, считается усиливающим или армирующим и называется *наполнителем*. Матричными материалами могут быть металлы и их сплавы, органические и неорганические полимеры, керамика и другие вещества. Усиливающими или армирующими компонентами чаще всего являются тонкодисперсные порошкообразные частицы или волокнистые материалы различной природы. За счет выбора армирующих элементов, их размеров, формы, ориентации в пространстве, варьирования их объемной

доли в матричном материале, а также прочности связи по границе «матрица-наполнитель», свойства композиционных материалов можно регулировать в значительных пределах. Одно из важнейших достоинств композиционных материалов – это возможность изготовления из них элементов изделий с заранее заданными свойствами, наиболее отвечающими условиям работы деталей и конструкций.

Сочетание металлической матрицы и различных наполнителей, обладающих специальными свойствами, открывает широкие возможности дня создания новых уникальных материалов для различных отраслей техники. В настоящее время производство изделий из металломатричных композиционных материалов находится на уровне самоокупаемости и развернуто в таких странах, как США, Великобритания, Канада, Германия, Франция, Япония, Китай и др. Основными преимуществами композиционных материалов на металлической основе по сравнению с другими основами являются высокие значения механических характеристик, зависящих от свойств матрицы (предела прочности и модуля упругости в направлении, перпендикулярном оси армирующих волокон), высокая пластичность, вязкость разрушения, сохранение прочностных характеристик до высоких температур, высокая тепло- и электропроводность, высокая технологичность (деформируемость, обрабатываемость).

Наиболее перспективными материалами для матриц металлических композиционных материалов являются металлы, обладающие небольшой плотностью – алюминий, магний, титан – и сплавы на их основе. Особенно выгодно среди них отличается алюминий, обладающий высокой коррозионной стойкостью и являющийся высокотехнологичным конструкционным материалом. Хорошие литейные свойства, возможность обработки давлением, механобработки, сварки и доступность обеспечивают широкое применение алюминия и сплавов на его основе в качестве матрицы композиционных материалов. В качестве наполнителей могут выступать оксиды, карбиды (обычно карбид кремния SiC), нитрид кремния (Si_3N_4), стеклянные или углеродные нити, волокна бора (бороволокна), стальная или вольфрамовая проволока.

При совмещении матрицы и наполнителя на границе их раздела наблюдаются различные химические и физические явления, в результате которых между компонентами композиции образуется устойчивая связь. Контактное взаимодействие фаз содержит ключ к пониманию природы новых свойств, которыми обладают композиты, и их целенаправленному регулированию. От прочности связи компонентов композиционного материала существенно зависят такие характеристики, как модуль упругости, сдвиговая прочность, вязкость разрушения, термостойкость и другие. Для обеспечения работоспособности материала, в том числе эффективной передачи механической нагрузки, граница раздела наполнитель-матрица должна иметь определенные свойства. Адгезионная связь по границе раздела не должна разрушаться под действием термических и усадочных напряжений, т. е. матрица должна быть совместима с упрочняющими элементами. С другой стороны, взаимодействие по границе раздела не должно приводить к деградации компонентов в результате химических реакций или чрезмерно интенсивных диффузионных процессов.

Сочетание в одном материале веществ, существенно различающихся по химическому составу, строению и физическим свойствам, делает весьма сложной задачу достижения термодинамической совместимости компонентов при температурах получения и эксплуатации композиционного материала. Наиболее известным, дешевым и технологичным в плане обеспечения термодинамической и химической совместимости компонентов для алюминиевых матриц является карбид кремния (SiC). Важными достоинствами такого материала являются его низкая плотность и высокие удельные характеристики. При создании композиционного материала на основе алюминия, дисперсно-упрочненного изометрическими частицами карбида кремния, сохраняются все достоинства алюминиевых сплавов (низкая плотность, высокая технологичность и т.д.) и повышаются прочностные характеристики за счет затруднения скольжения дислокаций.

При этом из-за незначительной разности в плотности материалов вес практически не изменяется (ρ_{Al}=2,7 г/см^3, ρ_{SiC}=3,21 г/см^3).

Мировые тенденции производства и применения металломатричных композиционных материалов свидетельствуют о явной потребности производства такого рода материалов и изделий из них (рис. 1). В настоящее время применение дискретно-армированных МКМ увеличилось примерно на 70% по сравнению с 2004 г., при этом основной сектор промышленности занимает наземный транспорт и электронная техника, затем авиационно-космическая, машиностроительная и другие виды промышленности. Применение металломатричных композиционных материалов на алюминиевой основе, армированных частицами карбида кремния, позволяет уменьшить массу деталей и элементов конструкций на 15-50 %, в 1,5-2 раза повысить их жесткость и усталостные характеристики по сравнению с прототипными металлическими материалами (например, титановыми и алюминиевыми сплавами), обеспечивая при этом повышение эффективности и конструкционной надежности.

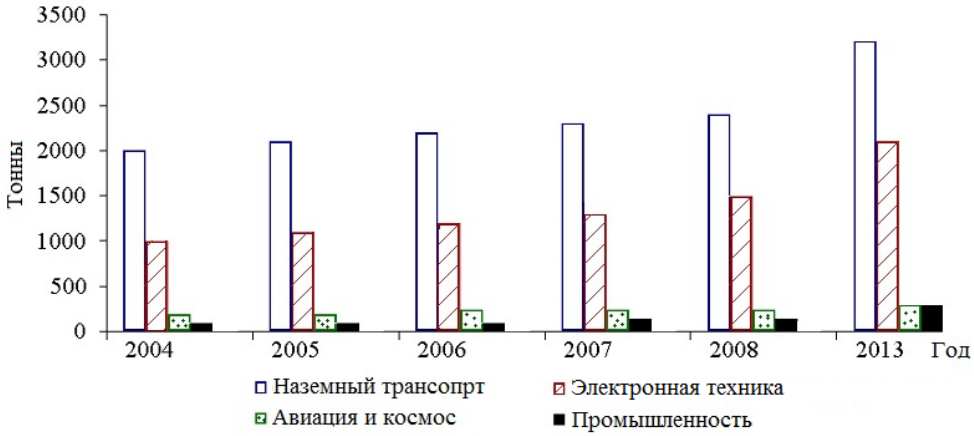


Рис. 1. Диаграмма применения дискретно-армированных МКМ на основе алюминиевых сплавов в различных отраслях промышленности с 2004 по 2013 гг

Высокие характеристики МКМ на основе алюминия, дисперсно-армированного частицами SiC, позволяют изготовить из этого материала такие ответственные детали, как, например, муфты лопасти вентилятора, которые держат роторную лопатку на несущем вертолета. Этот компонент требует огромной усталостной долговечности, превосходного сопротивления фреттинг-усталости и хорошей ударной вязкости. Муфты лопастей относятся к классу жизненно важных вращающихся деталей, так как разрушение компонента приводит к полной потере аппарата и его обитателей. Работа и долговечность вертолета сильно зависит от вращающейся массы, и принципиальным моментом при рассмотрении МКМ Al-SiC для данного применения стало уменьшение вращающейся массы и высокой стоимости, связанной с титановым сплавом Ti-6-4, который был заменен на МКМ.

Этот пример и анализ мирового опыта применения КМ рассматриваемой системы и ряд явно выраженных преимуществ по сравнению с традиционно используемыми конструкционными материалами требует аккумулирования и систематизации накопленных знаний для успешного внедрения металломатричных композиционных материалов на отечественный рынок современных конструкционных материалов и, в частности, МКМ на алюминиевой основе, дисперсно-упрочненных карбидом кремния.

Выбор технологического метода получения МКМ определяется в основном следующими факторами: видом исходных материалов, возможностью введения упрочнителя в матрицу без повреждения, создания прочной связи на границе раздела, максимальной реализации в материале свойств компонентов, получения необходимого распределения наполнителя в матрице, совмещения процессов получения

композиционного материала и изготовления из него детали, а также экономичностью процесса. Существенную роль при выборе метода часто играет также наличие того или иного вида оборудования. Вес способы производства металлокомпозитов можно объединить в несколько групп: твердофазное и жидкофазное формование, осаждение из газовой фазы, формование методом in-situ.

Для наполнения алюминиевых сплавов дисперсными частицами карбида кремния среди твердофазных методов совмещения наиболее привлекательными согласно основным факторам выбора являются методы порошковой металлургии. Образцы были изготовлены по технологии, разработанной ФГУП «ВИАМ» и заключающейся в предварительном перемешивании порошков алюминиевого сплава и дисперсных частиц карбида кремния до получения гомогенной смеси, механическом легировании (с целью обеспечения стабильного равномерного распределения частиц армирующей фазы в матрице), последующим компактировании и экструзии. Схема процесса представлена на рис. 2.

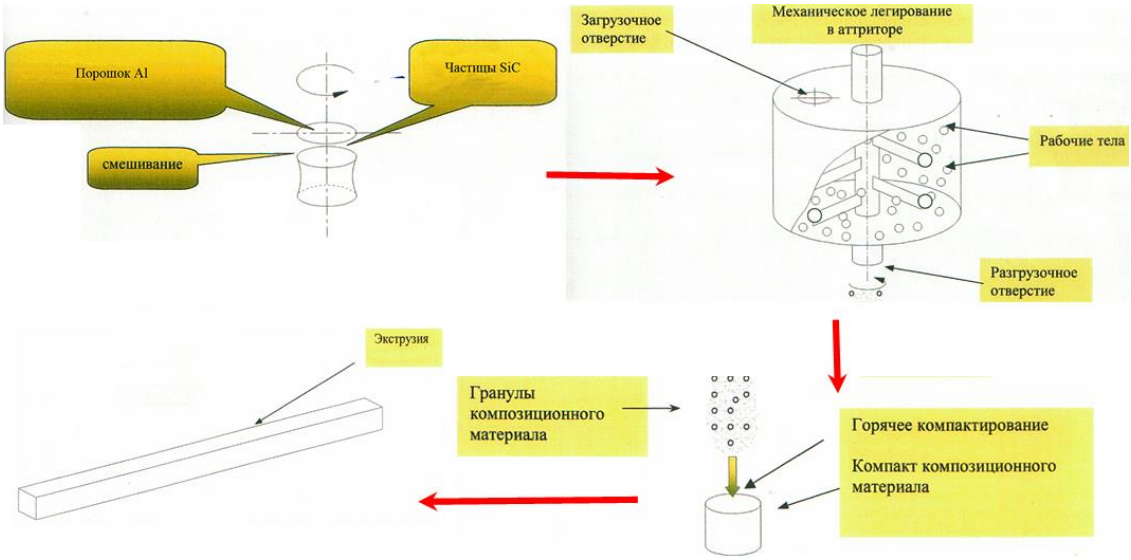


Рис. 2. Метод изготовления МКМ Al-SiC, разработанный в ФГУП «ВИАМ»

С помощью данной технологии во многих случаях при различных сочетаниях матрицы и наполнителя удается создать прочную связь между компонентами. Температура и давление в каждом конкретном случае подбирают отдельно, технология ориентируется на отдельные типы изделий. К недостаткам следует отнести: неконтролируемое качество связи, наличие пористости, дорогое оборудование и необходимость изготовления приспособлений для обработки порошков.

Среди жидкофазных процессов для получения образцов был выбран способ механического замешивания наполнителя в матричные расплавы (рис. 3). Данный способ является наиболее технологичным и дешевым, качество получаемых при этом композиционных материалов зависит от смачивающей способности матричного расплава, условий замешивания и последующей обработки.

Основными преимуществами жидкофазных методов перед твердофазными являются возможность получения изделий сложной формы, высокая производительность процесса, возможность автоматизации технологических процессов и реализация непрерывных производственных процессов. Недостатками жидкофазных методов являются более высокие температуры процесса, отрицательные последствия межфазных взаимодействий в композиционных материалах, ограниченность круга компонентов в связи с требованием обеспечения смачивания и большой разницы в температурах плавления.

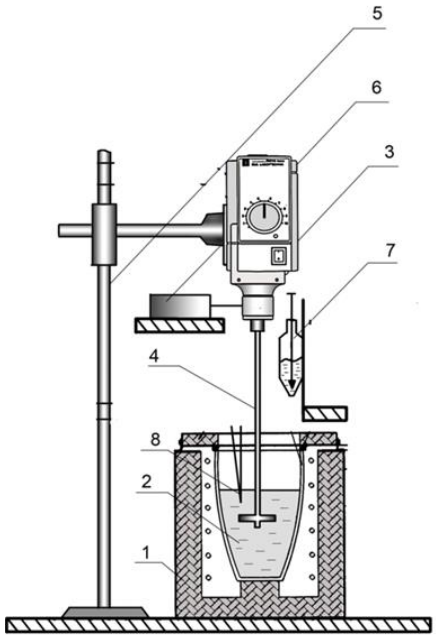


Рис. 3. Оборудование, используемое для изготовления МКМ Al-SiC литейным способом:
1 – печь сопротивления;
2 – тигель с расплавом;
3 - электронная верхнеприводная мешалка RW 16;
4 – лопастной замешиватель (импеллер);
5 – держатель;
6 – тахометр;
7 – вибропитатель

Твердость – способность материала оказывать сопротивление контактной деформации или хрупкому разрушению при внедрении индентора в его поверхность – является важной механической характеристикой и служит наиболее наглядным показателем проявления упрочнения, а в случае с дисперсно-упрочненными материалами косвенно характеризует равномерность распределения армирующего компонента в матрице, а, следовательно, равномерность распределения свойств. Очевидно, что задача определения твердости металломатричных композиционных материалов обладает большим практическим значением.

Замеры твердости на образцах проводились по методам Бринелля и Роквелла по шкале HRB. Данные методы дают более надежные результаты по сравнению с другими методами при оценке твердости композиционного материала, поскольку при проведении измерений воздействию индентора подвергается большой объем материала. При испытании на твердость по методу Бринелля (ГОСТ 9012-59) в поверхность материала вдавливается твердосплавный шарик под действием некоторой нагрузки и после ее снятия измеряется диаметр отпечатка. Твердость по Бринеллю НВ подсчитывается как отношение нагрузки к площади поверхности сферического отпечатка. В данной работе твердость по методу Бринелля измерялась на твердомере Wilson 930N с нагрузкой 62,5 кгс шариком диаметром 2,5 мм. Для уменьшения погрешности измерений выполнялось 5 замеров на каждом образце с последующим нахождением среднего значения.

При испытании на твердость по методу Роквелла (ГОСТ 9013-59) по шкале HRB в поверхность материала вдавливается стальной шарик диаметром 1,588 мм. Вначале под действием предварительной нагрузки индентор вдавливается на некоторую малую глубину, затем прикладывается основная нагрузка и индентор вдавливается на большую глубину. После этого основную нагрузку снимают. Под действием упругой деформации индентор поднимается вверх, но не возвращается в прежнее положение. Разность этих глубин вдавливания и соответствует значению твердости. За единицу твердости

принимают разность глубин вдавливания 0,002 мм. Преимущество метода Роквелла по сравнению с методом Бринелля заключается в том, что пропадает необходимость оптического измерения геометрических параметров отпечатка и связанная с этим ошибка. В данной работе твердость по методу Роквелла измерялась на твердомере Emco-test type N3A001 стальным шариком диаметром 1,588 мм при нагрузке 100 кг. Для уменьшения погрешности измерений выполнялось 5 замеров на каждом образце с последующим нахождением среднего значения.

Для оценки влияния армирующей фазы на твердость алюмоматричных композиционных материалов был выбран ряд образцов на основе различных сплавов алюминия с различным содержанием карбида кремния и полученных по разным технологиям совмещения. Химический состав матриц исследуемых композиционных материалов представлен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав матриц исследуемых сплавов

	Маркировка сплава	Si, %	Cu, %	Mg, %	Mn, %	Ti, %	Cr, %	Fe, %	Zn, %	Др., %	Al	ГОСТ
Чистый Al	А98	0,006	0,002	0,002	0,002	0,002	-	0,006	0,003	Ga 0,003	99,98	11069-2001
Деформируемые сплавы	Д16	0,50	3,8-4,9	1,2-1,8	0,3-0,9	0,15	0,1	0,5	0,25	-	ост.	4784-97
	АМг1	0,3	0,2	0,5-1,1	0,2	-	0,1	0,7	0,25	-	ост.	4784-97
Литейные сплавы	АК12 (АЛ2)	10-13	0,6	0,1	0,5	0,1	-	-	0,3	Zr 0,1	ост.	1583-93
	АК12М2МгН (АЛ25)	11-13	1,5-3,0	0,8-1,3	0,3-0,6	0,05-0,20	0,2	0,7	0,5	Ni 0,8-1,3	ост.	1583-93

Значения твердости композитов на основе *чистого алюминия* были взяты из работ [7] и [8]. В работе [7] образцы были получены твердофазным методом горячего прессования порошка технически чистого алюминия размером 25 и 180 мкм и карбида кремния размером 10 мкм; в работе [8] образцы были получены жидкофазным методом механического замешивания частиц карбида кремния в расплав алюминия. Твердость в обоих случаях измерялась по методу Бринелля. Результаты представлены в табл. 2 и на рис. 4.

Таблица 2. Твердость (НВ) образцов на основе алюминия с различным содержанием SiC по данным работ [7] и [8].

Способ получения		Содержание SiC в образце, %						
		0	5	10	15	20	25	30
Твердофазное формование [7]	Al 180 мкм	37	57	76	-	81	-	-
	Al 25 мкм	35	46	49	-	66	-	-
Жидкофазное формование [8]		28,5	40,2	41,1	43,7	44,4	45,5	41,9

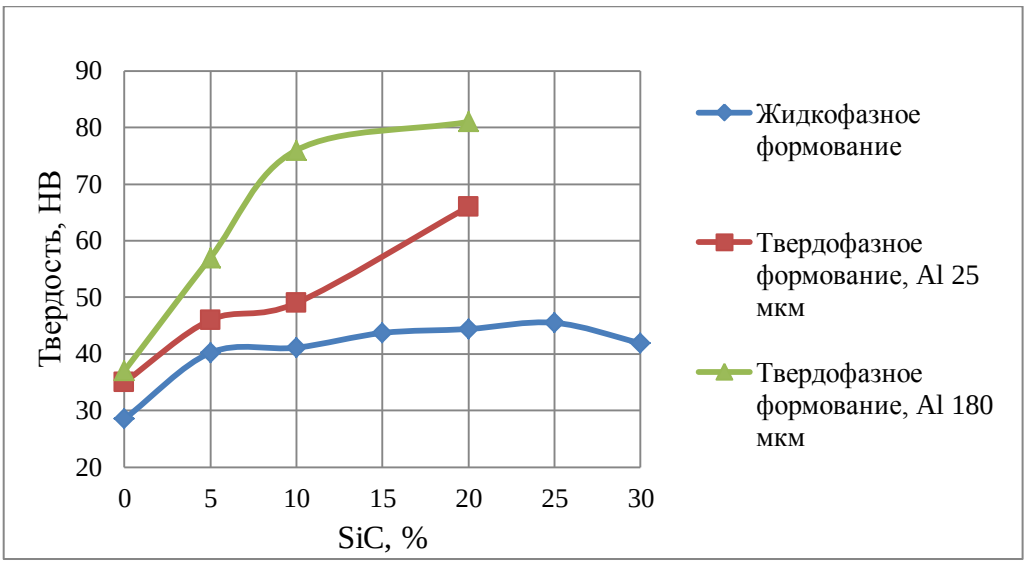


Рис.4. Зависимость твердости образцов на основе алюминия от способа получения и содержания SiC

Твердость композитов на основе *деформируемых сплавов* была изучена на примере сплавов Д16 и АМг1. Результаты измерений твердости методом Роквелла композитов на основе сплава Д16, полученных жидкофазным способом механического замешивания, представлены в табл. 3 и на рис. 5. Твердость образцов на основе Д16, полученных твердофазным методом прессования порошков, заимствована из работы [9].

Таблица 3. Твердость (HRB) образцов на основе сплава Д16 с различным содержанием SiC по результатам опытных данных и работы [10]

Способ получения	Содержание SiC, %						
	0	2,5	5	15	20	30	40
Жидкофазный	26	32,5	37	42	-	-	-
Твердофазный [10]	105	-	-	-	166	251	270

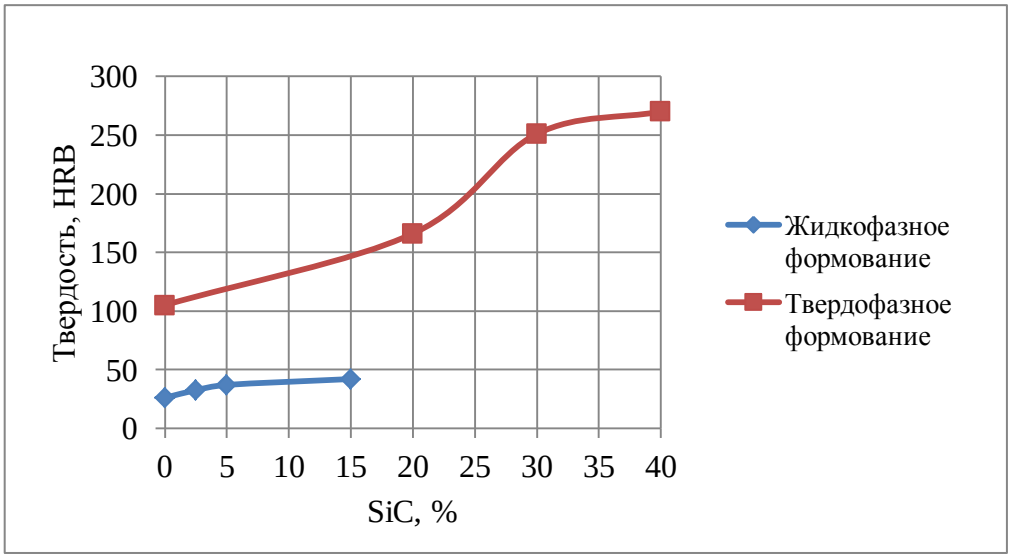


Рис. 5. Зависимость твердости образцов на основе сплава Д16 от способа получения и содержания SiC

По данным работы [10] было проанализировано значение микротвердости для композитов на основе сплава АМг1, полученных жидкофазным способом механического замешивания (табл. 4). Измерения микротвердости позволяют получить количественные

данные об изменении свойств матрицы при армировании и сделать заключения о технологическом процессе и поведении материала в условиях эксплуатации.

Таблица 4. Микротвердость образцов на основе сплава АМг1, полученных жидкофазным способом, по данным работы [10]

Содержание SiC, %	2,5	5
Разброс значений микротвердости, кг/мм^2	64 – 119	96,5 – 119
Среднее значение, кг/мм^2	90	99

Рассматриваемые образцы на основе *литейных сплавов* были получены жидкофазным методом механического замешивания. Значения твердости по Роквеллу композитов на основе сплава АК12 с различным содержанием SiC были взяты из работы [10] и представлены в табл. 5 и на рис. 6.

Табл. 5. Твердость образцов (HRB) на основе сплава АК12, полученных жидкофазным способом, по результатам опытных данных и работы [10].

Содержание SiC, %	0	2,5	5	15
Значение твердости, HRB	26	32,5	37	42

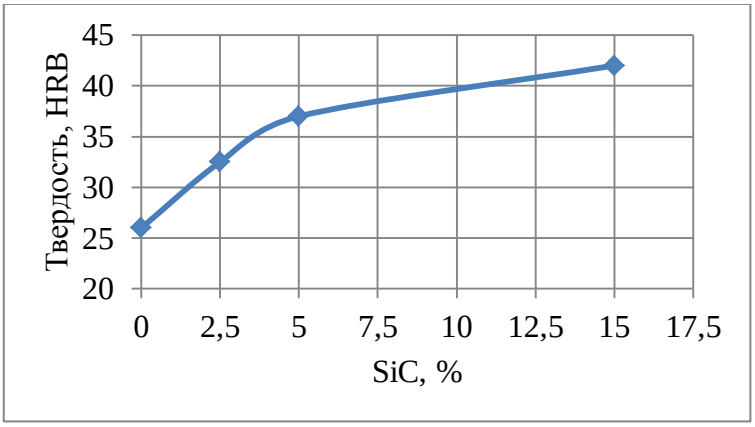


Рис. 6. Зависимость твердости образцов, полученных жидкофазным формованием на основе сплава АК12, от содержания SiC

Результаты измерения твердости образцов с различным содержанием частиц карбида кремния на основе сплава АК12М2МгН, полученных жидкофазным способом механического замешивания, представлены в табл. 6 и на рис. 7.

Таблица 6. Твердость образцов (HRB) с различным содержанием SiC на основе сплава АК12М2МгН, полученных жидкофазным способом.

Содержание SiC, %	0	3	5,6	10
Значение твердости, HRB	64,7	79,8	85,2	93,2

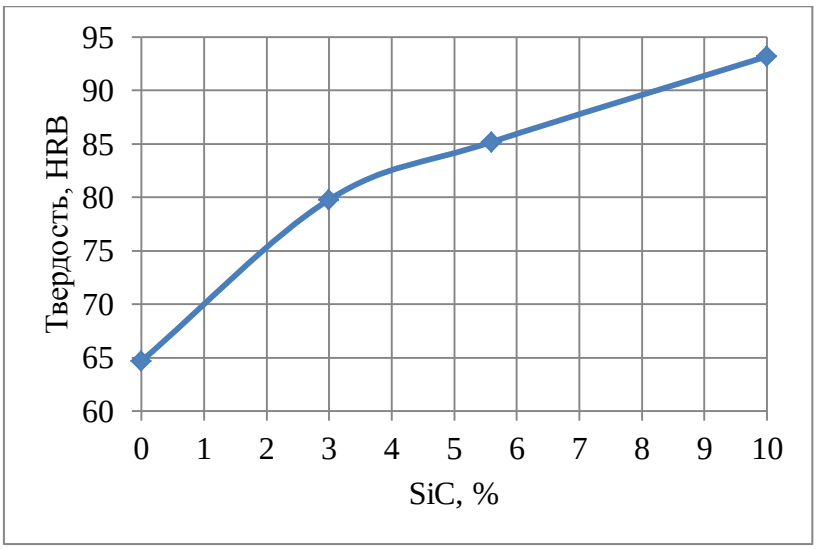


Рис. 7. Зависимость твердости образцов, полученных жидкофазным формованием на основе сплава АК12М2МгН, от содержания SiC

На рис. 8 представлена гистограмма распределения твердости образцов с различными матрицами и содержанием 5% SiC, полученных жидкофазным способом механического замешивания.

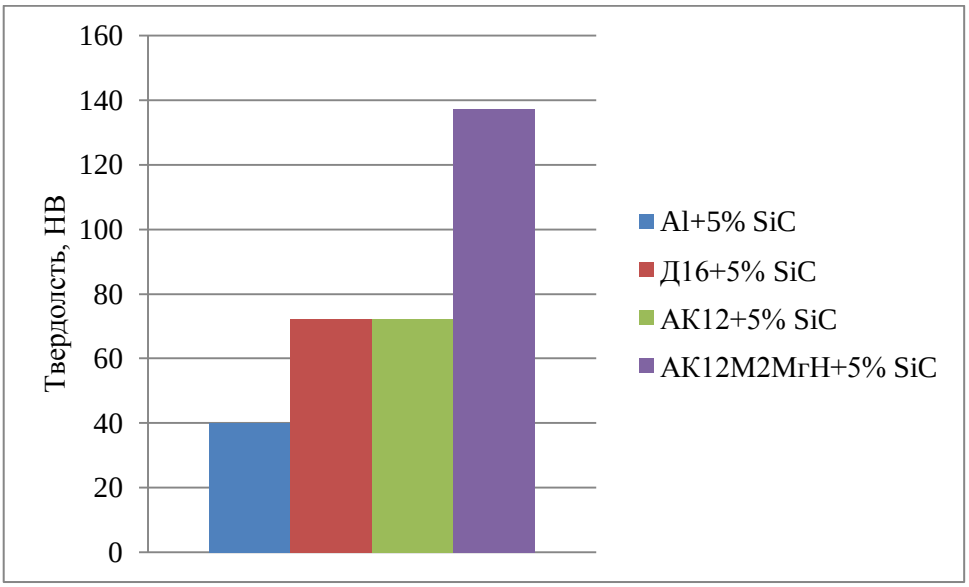


Рис. 8. Распределение твердости (HB) образцов на основе различных матриц с содержанием SiC 5%, полученных жидкофазным способом

Анализ результатов для всех матриц демонстрирует увеличение твердости композитов с увеличением количества армирующей фазы при любом способе получения. При одинаковом способе получения образцов и одинаковом количестве армирующей фазы, но при разных материалах матрицы, наблюдаются различные значения твердости, что позволяет сделать вывод о росте твердости композита с ростом твердости матрицы. Значения твердости образцов, полученных твердофазным формованием, превосходят значения твердости образцов такого же состава, но полученных жидкофазным методом. При жидкофазном формовании заметное упрочнение наблюдается уже при малых значениях содержания упрочняющей фазы (3-10 %). При содержании наполнителя свыше 15 % дальнейший прирост твердости уже не столь значителен. При твердофазном формовании увеличение твердости композитов с высоким содержанием наполнителя (20, 30, 40 %) по сравнению с твердостью матрицы, напротив, очень значительно. Учитывая сложность твердофазной технологии, целесообразным является производство композитов

с содержанием наполнителя ниже 15% жидкофазным методом, высоконаполненных композитов – твердофазным методом.

Литература

1. Композиционные материалы: Справочник / *В. В. Васильев, В. Д. Протасов, В. В. Болотин и др.*; Под общ. ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. —М.: Машиностроение, 1990. —512 е.: ил.
2. *Вотников А.М.* Технология композиционных материалов: Учеб.пособие. Перм.гос.техн.ун-т. Пермь, 1998. 138 с.
3. *Курганова, Ю. А.* Разработка и применение дисперсно-упрочненных алюмоматричных композиционных материалов / Ю. А. Курганова, Т. А. Чернышова. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – 223 с.
4. ГОСТ 11069-2001. Алюминий первичный. Марки.
5. ГОСТ 1583-93. Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия.
6. ГОСТ 4784-97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки.
7. *C. Hakan Gür,* Middle East Tech. Univ., Metallurgical and Materials Eng. Dept., Ankara-Turkey. Ultrasonic investigation of SiC-particle reinforced aluminium matrix composites.
8. *Manoj Singla, D. Deepak Dwivedi, Lakhvir Singh, Vikas Chawla*. Department of Mechanical Engineering, R.I.E.I.T., Railmajra, Distt. Nawanshahr, India. Development of Aluminium Based Silicon Carbide Particulate Metal Matrix Composite.
9. *Ю.А. Курганова, В.В. Березовский, Г.П. Фетисов, А.А. Шавнев.* Анализ перспективности использования дисперсно-упрочненных алюмоматричных композиционных материалов системы Al-SiC в изделиях авиационного назначения.
10. *Чернышова Т. А.* Литые дисперсно-упрочненные алюмоматричные композиционные материалы: изготовление, свойства, применение / Т. А. Чернышова, Ю. А. Курганова, Л. И. Кобелева, Л. К. Болотова. – Ульяновск: УлГТУ, 2012. – 295 с.
11. *Матюнин В.М.* Механико-технологические испытания и свойства конструкционных материалов: учебное пособие. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 140 с.

УДК 620.18:620.17

ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМ АРМИРОВАНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЛИСТОВЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ МКМ Al-B, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ НИХ

Александра Игоревна Степанова,
студентка 5 курса,
кафедра «Материаловедение»,
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Научные руководители: Ю. А. Быков[(1)], О. П. Баженова[(2)],
[(1)] доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение»,
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
[(2)] ФГУП «НПО им. С. А. Лавочкина»

Улучшение весовых характеристик изделий ракетно-космической техники невозможно без применения в конструкциях материалов с более совершенными эксплуатационными свойствами. Металлические композиционные материалы (МКМ), армированные высокопрочными и высокомодульными волокнами, обладают высокой конкурентоспособностью по сравнению с традиционными материалами, используемыми в

данной области. Уникальные свойства МКМ связаны с возможностью достижения высоких значений прочности, упругости в сочетании с малой плотностью. Важной особенностью этих материалов является возможность регулирования механических свойств путем выбора соответствующей схемы армирования, исходя из требований к конструкциям, в которых он применяется. Одной из наиболее перспективных, для создания элементов конструкций летательных аппаратов, считается композиция алюминий – борные волокна. Отличительным признаком композитов этого класса является тот факт, что они одинаково эффективно работают в условиях приложения, как растягивающих, так и сжимающих нагрузок. Поэтому, с точки зрения проектировщика и конструктора, этот материал является незаменимым при создании ферменных высоконагруженных конструкций, длинномерных штанг, крупногабаритных платформ для установки приборов различного назначения, тубусов телескопов и целого ряда других агрегатов космических аппаратов.

Оценка свойств композита должна быть произведена на образцах, изготовленных по одной технологии и с соблюдением тех же термомеханических параметров изготовления, что и предполагаемые элементы конструкции. Область исследования характеристик материала должна быть также взаимосвязана с условиями эксплуатации конструкции. Поэтому настоящая работа достаточно полно охватывает почти все основные виды испытаний листов из МКМ Al-B с разными схемами армирования в диапазоне температур от 20 до 250 °С.

Листы из МКМ Al-B изготовляются методом горячей прокатки пакета монолент-полуфабрикатов, представляющих собой однослойные композиционные материалы с матрицей из алюминиевого сплава АМг6. Монолента-полуфабрикат изготавливается методом плазменного напыления матрицы на вращающийся барабан с намотанными на него с заданным шагом волокнами бора. Микроструктура моноленты в разрезе показана на рис. 1.

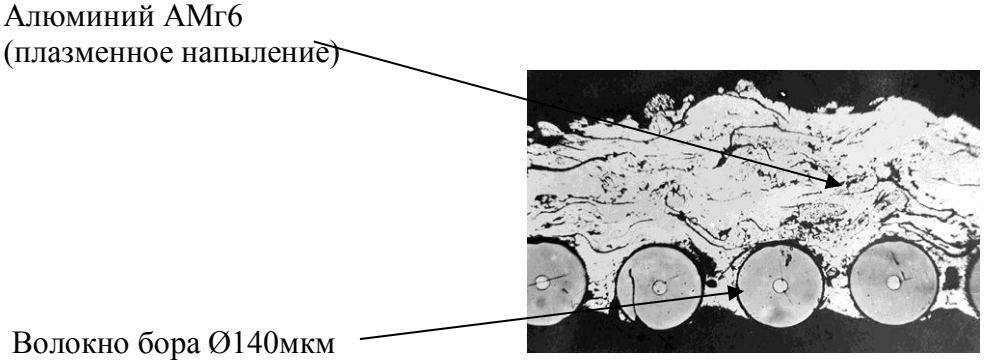


Рис. 1. Микроструктура моноленты (поперечное сечение)

Борные волокна получают осаждением бора из газовой фазы на нагретую до температуры 1100-1200°С поверхность вольфрамовой нити диаметром от 12.5 до 16 мкм. Осаждение бора путем восстановления его из трихлорида бора протекает в среде водорода по реакции:

$2BCl_3 + 3H_2 = 2B + 6HCl$

Волокна не токсичны, взрывобезопасны, не выделяют в окружающую среду вредных паров и газов.

Шаг укладки волокна составляет 0,18 мм. В процессе получения монолент используются волокна бора без защитных покрытий, плазменное напыление матрицы осуществляется на воздухе. Полученная матрица имеет пористую структуру, толщина моноленты-полуфабриката после изготовления равна 0,31 мм с разнотолщинностью

0,07мм, а толщина монослоя после прессования в многослойной листовой заготовке составляет 0,16÷0,18 мм.

Применение процесса плазменного напыления матрицы на поверхность намотанных на оправку волокон преследует одновременно две цели:

- закрепление (фиксация положения) уложенного волокна;
- предварительное распределение волокна в матрице.

При сборке пакетов различных схем армирования между слоями моноленты прокладываются слои из алюминиевой фольги АД1 толщиной 20 мкм. На наружные поверхности пакетов в виде плакировочных слоев укладываются слои той же самой фольги, но уже толщиной 50 мкм. При ортогональной схеме армирования фольга внутри пакета монолент необходима для гарантированного исключения возможности дробления волокон, а в однонаправленной структуре - для соблюдения одинаковых условий (в сравнении с ортогональной схемой) изготовления и взаимодействия волокон бора с матрицей, а также уменьшения разницы значений объемной доли волокон для различных структур армирования. Кроме того, при уменьшении объемной доли волокон, прочностные характеристики материала в поперечном направлении и при сдвиге возрастают и становятся более стабильными.

Технологический процесс изготовления изделий из металлокомпозита Al-B должен обеспечивать:

- заданное упорядоченное распределение волокон бора в алюминиевой матрице;
- заданное объемное соотношение между волокном и матрицей;
- прочную связь по границе «волокно – матрица»;
- отсутствие значительных потерь свойств исходных компонентов;
- получение монолитного материала без пор, трещин и расслоений;
- получение изделия требуемой формы.

В общем виде технология получения изделий из бороалюминия, разработанная в России, включает:

- изготовление монослойного полуфабриката в виде слоя однонаправленных волокон, уложенных с определенным шагом и скрепленных матричным сплавом, нанесенным с помощью плазменного напыления;
- раскрой полуфабриката на карточки требуемой формы;
- сборку многослойной заготовки изделия путем выкладки монослоев полуфабриката;
- горячее прессование многослойной заготовки.

Горячее прессование многослойной заготовки изделия производится в следующем режиме: $T = 450\text{-}540^0C$, $P = 50\text{-}70$ МПа, $t = 10\text{-}40$ мин. Указанные пределы технологических параметров являются оптимальными, поскольку обеспечивают наиболее высокий уровень прочностных характеристик бороалюминия, что было подтверждено экспериментально.

Выбор таких параметров обусловлен следующим:

- температура прессования должна обеспечивать достаточную пластичность матричного материала, способствующую его распределению и уплотнению, а также диффузионную сварку, как между отдельными монослоями полуфабриката, так и между волокнами и алюминиевой матрицей. Одновременно температура прессования не должна быть высока настолько, чтобы в процессе прессования прошло заметное химическое взаимодействие между алюминиевой матрицей и борными волокнами, приводящее к деградации волокон;
- продолжительность прессования определяется скоростями деформации матричного сплава и протекания диффузионных процессов в матричном сплаве и по границе раздела волокно-матрица и, следовательно, зависит от величины температуры

прессования. Чем выше температура прессования, тем меньше его продолжительность и наоборот;

- величина давления прессования должна обеспечивать пластическое течение матричного сплава и, тем самым, образование физического контакта между слоями полуфабриката, а также между волокнами и матрицей в прессуемой заготовке. Причем выбраны величины, близкие к нижнему порогу, поскольку увеличение давления прессования не оказывает влияния на протекание диффузионных процессов, но в то же время требует применения более мощного оборудования и повышает вероятность механического повреждения волокон.

Микроструктура листа после горячего прессования многослойной заготовки приведена на рис. 2.

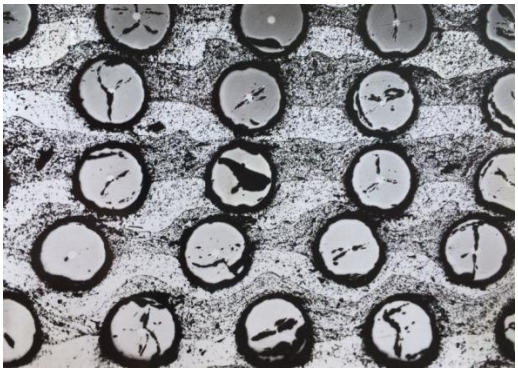


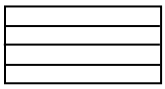
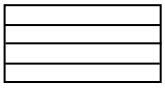
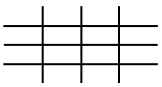
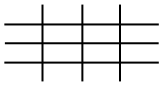
Рис. 2. Микроструктура листа МКМ

Монослойный полуфабрикат представляет собой, в основном, механическое соединение волокон и матричного сплава и требует дальнейшей обработки в части уплотнения матричного сплава и образования прочной диффузионной связи между волокном и матрицей. Раскрой полуфабриката на карточки прямоугольной формы, которые требуются для изготовления листов, производится вручную с помощью специального ножа-резака. Сборка из карточек многослойных заготовок изделия осуществляется также вручную.

Бороалюминиевые листы-карточки имеют размеры 400х400хh мм, где h – варьируемая толщина листа. Заготовка листа осуществляется путем последовательной укладки карточек в виде пакета по заданной схеме. Многослойный пакет затем помещают между обогреваемыми плитами пресса и подвергают горячему прессованию. В опытах используют не менее 9 образцов каждого типа укладки карточек.

При изготовлении однонаправленных бороалюминиевых листов типа А толщиной 1 мм заготовка содержит 6 слоев полуфабриката. Сборка карточек заготовки производится так, чтобы волокна во всех карточках были ориентированы в одном направлении. Получение однонаправленных бороалюминевых листов типа В толщиной 1,2 мм осуществляется аналогично, но многослойная заготовка листа содержит 7 слоев полуфабриката. Многослойные заготовки листов с ортогональным армированием типа С и типа D содержат по 8 слоев полуфабриката, что обеспечивает после прессования толщину листов около 1,35 мм. Сборка листов типа С осуществляется так, чтобы волокна всех смежных слоев были ориентированы во взаимно перпендикулярных направлениях относительно друг друга. При изготовлении листов типа D два внутренних слоя помещаются посередине, так чтобы волокна были ориентированы параллельно, а волокна шести наружных слоев – перпендикулярно относительно них. Различные типы листов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Типы листов

Схема армирования	Обозначения листов	Толщина листа h, мм	Количество слоев, шт	Направление укладки волокон
	A	1	6	Однонаправленное армирование
	B	1.2	7	Однонаправленное армирование
	C	1.35	8	Последовательное ортогональное армирование
	D	1.35	8	Ортогональное армирование, распределенное по зонам

При испытаниях на растяжение используются образцы типа «лопатки» размерами 15x120xh мм для создания условий равномерного нагружения образцов и их разрушения в рабочей части (рис. 3). База испытаний составляет 10 мм. Предел прочности при растяжении $\sigma_{в,раст}$, МПа, определяют по формуле:

$$\sigma_{в,раст} = \frac{F_{max}}{b \cdot h}$$

где F_{max} – максимальная нагрузка, предшествующая разрушению образца, Н;

b – ширина образца, мм;

h – толщина образца, мм.

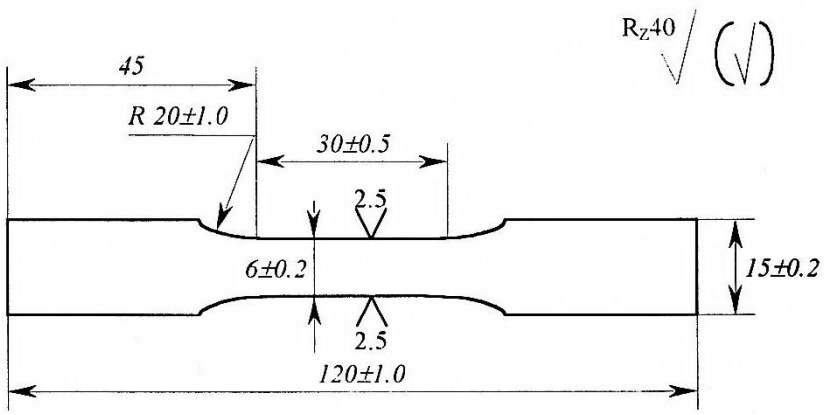


Рис. 3. Образец для испытаний на предел прочности при растяжении

Для определения предела прочности при сжатии как однонаправленного композиционного материала Al-B, так и при ортогональном армировании применяют образцы в виде полосы прямоугольного сечения размером 20x60xh мм (рис. 4). База испытаний составляет 4 мм. Предел прочности при сжатии $\sigma_{в,сж}$, МПа, определяют по формуле:

$$\sigma_{в,сж} = \frac{F_{max}}{b \cdot h}$$

где F_{max} – максимальная нагрузка, предшествующая разрушению образца, Н;

b – ширина образца, мм;

h – толщина образца, мм.

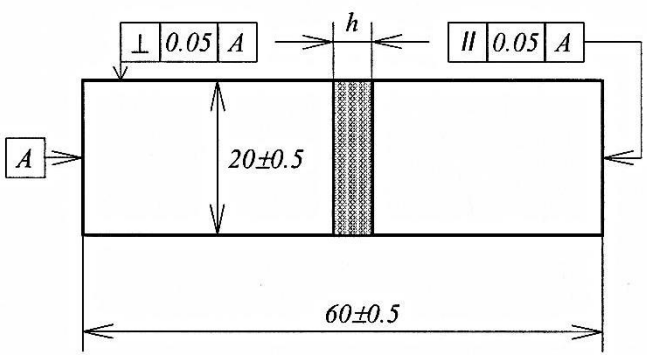


Рис. 4. Образец для испытаний на предел прочности при сжатии

Для проведения уточненного прочностного расчета цилиндрического элемента особый интерес представляет задача определения экспериментальным путем необходимых для этого расчета механических характеристик, а именно:

- $E_{сж}$ – модуля упругости при сжатии;
- $\tau_в$ – прочность на сдвиг.

С этой целью был специально изготовлен плоский лист D со схемой армирования, идентичной схеме армирования цилиндрического элемента. Образцы для определения модуля упругости при сжатии $E_{сж}$ выглядят аналогично образцам, применяемым для определения предела прочности при сжатии, но имеют длину 120 мм. Модуль упругости при сжатии $E_{сж}$, МПа, определяют по формуле:

$$E = \frac{\Delta F_{сж}}{b \cdot h}\frac{l}{\Delta l} = \frac{\Delta F_{сж}}{b \cdot h}\frac{1}{\Delta \varepsilon_{сж}}$$

где $\Delta F_{сж}$ – приращение нагрузки, Н;

l – база тензометра, мм;

Δl – изменение базы тензометра (деформация мерной базы) при изменении нагрузки на $\Delta F_{сж}$, мм;

$\frac{\Delta l}{l} = \Delta \varepsilon_{сж}$ – изменение относительной деформации образца при изменении нагрузки на $\Delta F_{сж}$, мм;

b – ширина образца, мм;

h – толщина образца, мм.

При испытании на сдвиг образцы должны иметь форму полосок размерами 8х80хh мм с надрезами толщиной 0,3 мм на противоположных сторонах, смещенными по длине образца на расстояние, равное базе испытаний (8 мм). Чертеж образца представлен на рис. 5. Предел прочности при сдвиге для МКМ Al-B, $\tau_В$, МПа, определяют по формуле:

$$\tau_В = \frac{F_{max}}{l \cdot h}$$

где F_{max} – максимальная нагрузка, предшествующая разрушению образца, Н;

l – расстояние между прорезями на образце, мм;

h – толщина образца, мм.

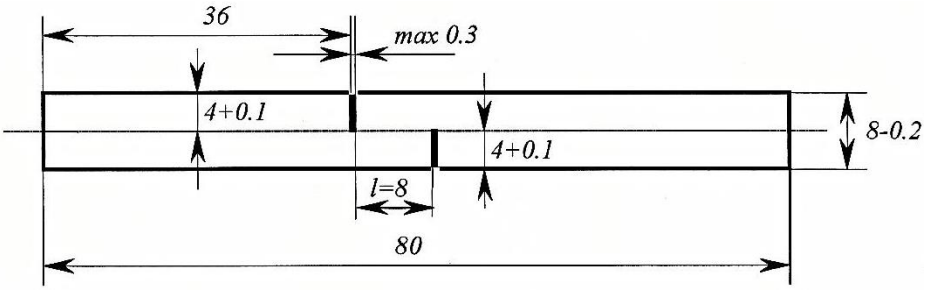
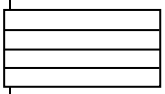
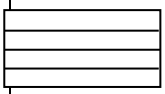
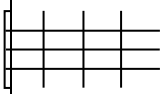


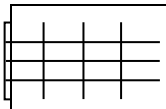
Рис. 5. Образец для испытаний на предел прочности при сдвиге

При однонаправленной схеме армирования все волокна по периметру окружены материалом матрицы, и разрушение от сдвига происходит именно по этой прослойке. Поэтому можно считать, что разрушающие напряжения сдвига близки по своей величине по всем направлениям в плоскости, перпендикулярной оси волокна, то есть предельные напряжения сдвига в плоскости образца равны разрушающим межслоевым напряжениям. Это же допущение можно принять и для материала с ортогональной схемой армирования, где соседние слои также разделены алюминиевой матрицей.

Усредненные опытные данные приведены в сводных таблицах. В табл. 2 даны свойства КМ в направлении укладки волокон. Если ортогональная схема армирования - то направление также вдоль волокон, расположенных на внешних поверхностях образцов. Экспериментальные характеристики материалов в перпендикулярном направлении приведены в табл. 3. Испытания образцов проводятся при нормальной (20^0C) и повышенной (до 250^0C) температурах. При нахождении упругих свойств максимальная предельная температура составляет величину 230^0C, для температуры 250^0C приведенные в таблицах упругие свойства получаются экстраполяцией.

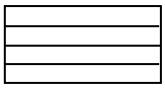
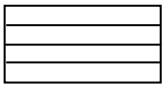
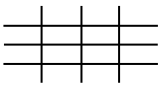
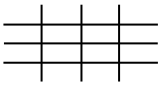
Таблица 2. Свойства композита вдоль волокон

Тип листа, толщина, мм	Предел прочности $\sigma_{в,\ раст}$ МПа	Предельная деформация $\varepsilon_{раст}$ %	Модуль упругости $E_{сж}$ ГПа	Предел прочности $\sigma_{в,\ сж}$ МПа	Прочность на сдвиг $\tau_в$ МПа	Температура испытаний, Т,^{0}C
 тип А; h=1,0 мм	1120	0,515	236	1820	108	20
	1017	0,546	233	1710	86	150
	901	0,647	223	-	-	230
	850	0,690	216	1350	41	250
 тип В; h=1,2 мм	1154	0,552	254	2505	139	20
	1070	0,576	245	2020	103	150
	980	0,666	226	-	-	230
	940	0,710	219	1540	47	250
 тип С; h=1,35 мм	501	0,450	181	1100	-	20
	481	0,507	176	970	-	150
	403	0,609	169	-	-	230
	355	0,645	166	780		250

 тип D; h=1,35 мм	838	0,87	189	1540	-	20

Анализ полученных характеристик вдоль волокон для различных структур армирования показывает, что предельные деформации близки друг другу (исключение – лист типа D, что требует дополнительных исследований). Предельные деформации находятся в диапазоне 0,5÷0,7 %. Это указывает на то, что определяющим являются деформации разрушения волокон уложенных в направлении нагрузки. Значения предельной деформации растут с увеличением температуры (на 30÷35 %), а снижение величины модулей упругости достигает при этом 10-15%. Отмечается падение продольной прочности с ростом температуры также на 20÷30 %. Прочность ортогональной структуры, примерно, в 2 раза ниже однонаправленной. Прочность сдвига при температуре 250^0C падает, примерно, в 2,5 раза по сравнению с его величиной при температуре 20^0C.

Таблица 3. Свойства композита поперек волокон

Тип листа, толщина, мм	$\sigma_{в,\ раст,}$ МПа	$\varepsilon_{сж,}$ %	$E_{сж,}$ ГПа	$\sigma_{в,\ сж,}$ МПа	T,^{0}C
 тип A; h=1,0 мм	97	0,100	162	255	20
	89	0,160	145	216	150
	63	0,247	112	-	230
	51	0,290	100	117	250
 тип B; h=1,2 мм	109	0,111	171	288	20
	96	0,178	153	231	150
	72	0,263	121	-	230
	62	0,320	110	129	250
 тип C; h=1,35 мм	472	0,515	177	1040	20
	463	0,560	174	920	150
	387	0,665	162	-	230
	340	0,695	155	720	250
 тип D; h=1,35 мм	321	0,537	149	630	20

Величина пределов прочности в композитах с ортогональной структурой примерно в 2 раза ниже, чем с однонаправленной схемой армирования. Для однонаправленных листов типа A, B закономерности изменения свойств в поперечном направлении те же, что вдоль волокон. У более толстых листов все деформативно-прочностные характеристики выше (на 5÷10 %). У листов типа C свойства поперек волокон на 5÷10 % ниже, чем вдоль волокон. Это важный факт, который указывает на то, что порядок укладки слоев по толщине листа оказывает влияние на жесткостные и прочностные характеристики материала. У листа D, модуль упругости меньше, чем и у однонаправленных листов в поперечном направлении.

Выполненные исследования показали, что металлические композиционные материалы системы «алюминий – борное волокно» сочетают в себе очень высокие значения прочности и жесткости, что делает их перспективными материалами для использования в высоконагруженных конструкциях, работающих при повышенных (до 200-250 °С) температурах.

Литература

1. Под ред. *Любина Дж., Геллера Б.Э.,* пер. с англ. Геллера. А.Б., Гельмонта М.М. Справочник по композиционным материалам. - М.: Машиностроение, 1988. – 448 с.
2. *Гардымов Г.П., Мешков Е.В., Пчелинцев А.В., Лашманов Г.П., Афанасьев Ю.А.* Композиционные материалы в ракетно-космическом аппаратостроении. – М.: СпецЛит, 1999. – 270 с.
3. *Мэттьюз Ф., Ролингс Р.* Композитные материалы. Механика и технология. – М.: Техносфера, 2004. – 408с.
4. *Krishan K. Chawla, Nikhilesh Chawla.* Metal Matrix Composites. – USA, NY, Heidelberg: Springer, 2006. – 401 p.
5. *Karl U. Kainer.* Metal Matrix Composites: Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering. USA: John Wiley & Sons, 2006. – 330 p.

УДК 621.787

ЗАКАЛКА СТАЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Арсений Петрович Козлов, Арсений Александрович Сержант,
студенты 5 курса,
кафедра «Материаловедение»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Л.В. Федорова,
доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение»

К настоящему времени имеющиеся возможности для повышения качества поверхностей способами только объемной термической обработкой практически полностью себя исчерпали. Для упрочнения отверстий ведущие предприятия в России и за рубежом используют способы повышения качества поверхностного слоя методами поверхностного пластического деформирования (ППД), обкатки, дробеструйной обработки, наклёпа, карбонитрации, статико-импульсной обработки и др.

Важное место в повышении долговечности широкого класса деталей машин отводится качеству материала не всего сечения изделия, а структурному состоянию и физико-механическим свойствам поверхностного слоя. Именно поверхностный слой во многом определяет износостойкость, сопротивление материала усталостному разрушению, контактную выносливость, коррозионную стойкость и другие важные эксплуатационные свойства [1-3].

Используемые в настоящее время различные способы повышения ресурса детали (специальная термообработка, напыление, ионное азотирование и т.д.) требуют применения дорогостоящего оборудования, иногда экологически небезопасного, специальной обработки упрочняемых поверхностей, дорогих высокопрочных порошков; после их применения зачастую необходимо дополнительно подвергать упрочненные поверхности шлифованию. В этой связи определенный интерес представляет метод

упрочнения стальных деталей электромеханической обработкой, при которой происходят структурные превращения, увеличивается плотность дислокаций, количество вакансий, происходят дробление блоков, образование сдвигов в зернах.

Сильное электрическое и силовое воздействие инициирует процессы аустенитно-мартенситного превращения, образование и дробление карбидов, измельчение зерен, что положительно сказывается на прочностных качествах стальных деталей.

Преимуществом электромеханической обработки (ЭМО) по сравнению с другими известными методами упрочнения является то, что геометрические параметры и качество поверхности обработанных изделий не меняются, не требуются дополнительные операции термообработки, шлифования, сам процесс отличается низким энергопотреблением и достаточно высокой производительностью, экологической чистотой. Также стоит отметить возможность управления процессом, плавную ступенчатую регулировку режимов.

Для упрочняющей обработки применялась установка для электромеханической обработки «Колибри» (рисунок 1).



Рис. 1 Установка механической обработки «Колибри»

Установка отличается своей компактностью и может быть установлена на металлорежущем оборудовании. Специальный инструмент подводят к обрабатываемой поверхности детали так, чтобы между ними возник хороший электрический контакт.

Электромеханическое воздействие реализуется при пропускании электрического тока большой плотности и низкого напряжения через зону контакта детали и инструмента, движущихся во взаимно перпендикулярных направлениях со скоростью υ и подачей S. При этом происходит высокоскоростной нагрев локального микрообъема поверхности с одновременным ее пластическим деформированием упрочняющим инструментом и последующее интенсивное охлаждение за счет отвода тепла вглубь материала.

В ходе проведения эксперимента проводились измерения микротвердости на упрочняемой поверхности втулок, обработанных при заданных значениях напряжения, силы тока, скорости вращения и усилия прижатия. Глубина упрочнения зависит от значений плотности тока, давления, скорости вращения:

$$Y = f(\Delta J, \mathrm{P}, \vartheta) \qquad (0.1)$$

где Y - глубина упрочнения по среднему диаметру резьбы; ΔJ - плотность тока, А/мм^2; P - давление, МПа; ϑ - скорость вращения детали, мин$^{-1}$.

В данной работе в качестве упрочняемых изделий выбраны втулки, широко применяемые на РЖД. Втулки выполнены из Стали 35. Детали до и после обработки изображены на рисунках 2 и 3 соответственно.

Таблица 1 - Химический состав Стали 35. ГОСТ 1050-88

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
0.32 - 0.4	0.17 - 0.37	0.5 - 0.8	≤ 0.3	≤ 0.04	≤ 0.035	≤ 0.25	≤ 0.3	≤ 0.08



Рисунок 1 – Детали до обработки

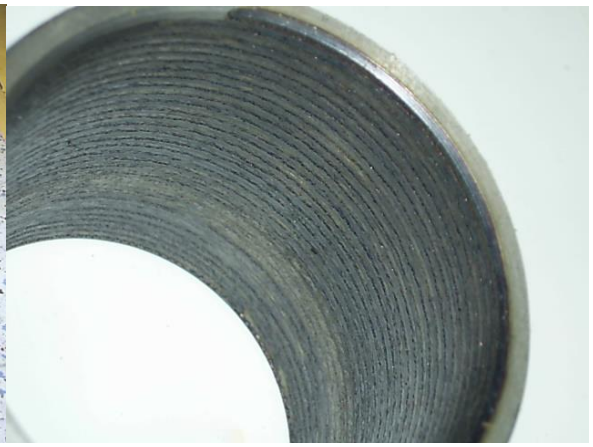


Рисунок 2 - Деталь после обработки

Для уточнения марки стали и проверки на наличие примесей был проведён рентгеноспектральный анализ. По химическому составу металл соответствует марке Стали 35. Количественная разница легирующих элементов допускается по ГОСТ 1050-88. Результаты анализа приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты рентгеноспектрального анализа

№ измерения	C, %	Cr, %	Cu, %	Mn, %	Ni, %	Si, %	Fe
1	0,36	0,08	0,09	0,60	0,03	0,09	осн
2	0,40	0,09	0,09	0,64	0,03	0,09	



Рисунок 3 – Образец после рентген анализа

Для изучения структуры упрочненного слоя и измерения его толщины на поверхностях втулок, подвергавшихся ЭМО, были изготовлены шлифы. Предпосылкой для всех металлографических исследований является изготовление шлифов, которые могут быть использованы для микроскопического исследования с помощью светового и

электронного микроскопов, для определения микротвердости, а также количественного измерения структурных составляющих и электронно-зондового микроанализа.

Было проведено травление шлифов в исходном состоянии и после ЭМО. После травления образца невооруженным глазом стали видны сегментообразные зоны термического влияния, возникшие в результате электромеханической обработки. Для изучения влияния обработки на свойства стали была измерена микротвердость: в сердцевине образца, с поверхности и до сердцевины, а также вдоль упрочненного слоя. Измерения проводились на расстоянии 0,3 мм друг от друга.

Упрочненный слой ввиду особенностей электромеханического упрочнения имеет не постоянную по значению микротвердость. При контакте ролика с образцом появляется зона термического влияния. В результате обработки эти зоны накладываются друг на друга, образуя более или менее упрочненную структуру поверхности.

Помимо измерения микротвердости также было проведено фотографирование. (рисунки 5-10). Изучение и фотографирование структур были выполнены на металлографическом микроскопе EmcoTest DuraScan при увеличении 100 и 400.

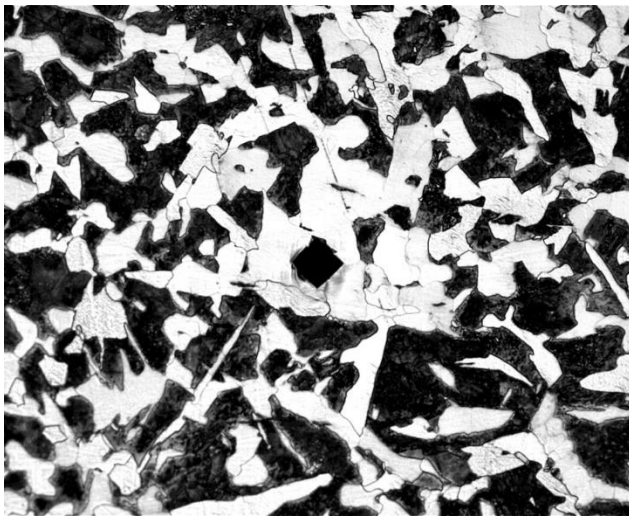


Рис. 4 Исходная микроструктура Стали 35 (х100)



Рис. 5 Микроструктура упрочненного слоя Стали 35 (х100)

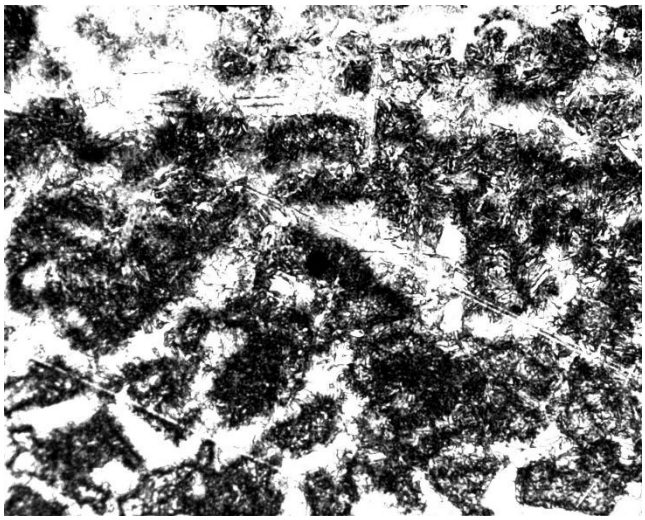


Рис. 6 Микроструктура упрочненного слоя Стали 35 (х100)



Рис. 7 Микроструктура упрочненного слоя Стали 35 (х400)

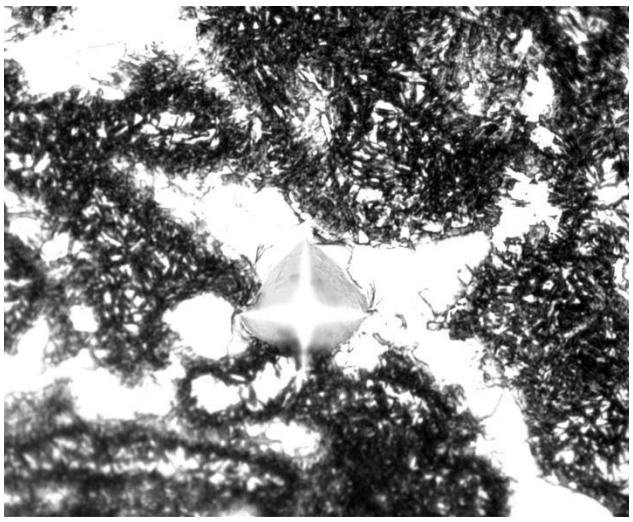


Рис. 8 Микроструктура упрочненного слоя Стали 35 (х400)

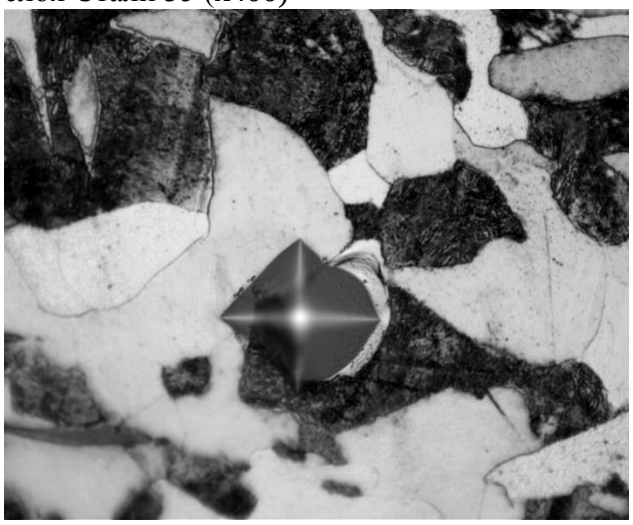


Рис. 9 Исходная микроструктура Стали 35 (х400)

Исходя из полученных данных видно, что микротвердость поверхностного слоя, несмотря на разброс значений, превосходит микротвердость в сердцевине. Наибольшие значения микротвердости поверхностного слоя превосходят исходное в 4 раза. В упрочненном слое микротвердость имеет максимальную величину HV 0,05/5-678, а при переходе через границу упрочненного слоя микротвердость заметно уменьшается, но при этом превышает микротвердость основы. Структурно-фазовый анализ показывает, что вблизи от границы слоя преобладает перлит, а ближе к основе количество перлита и феррита выравнивается.

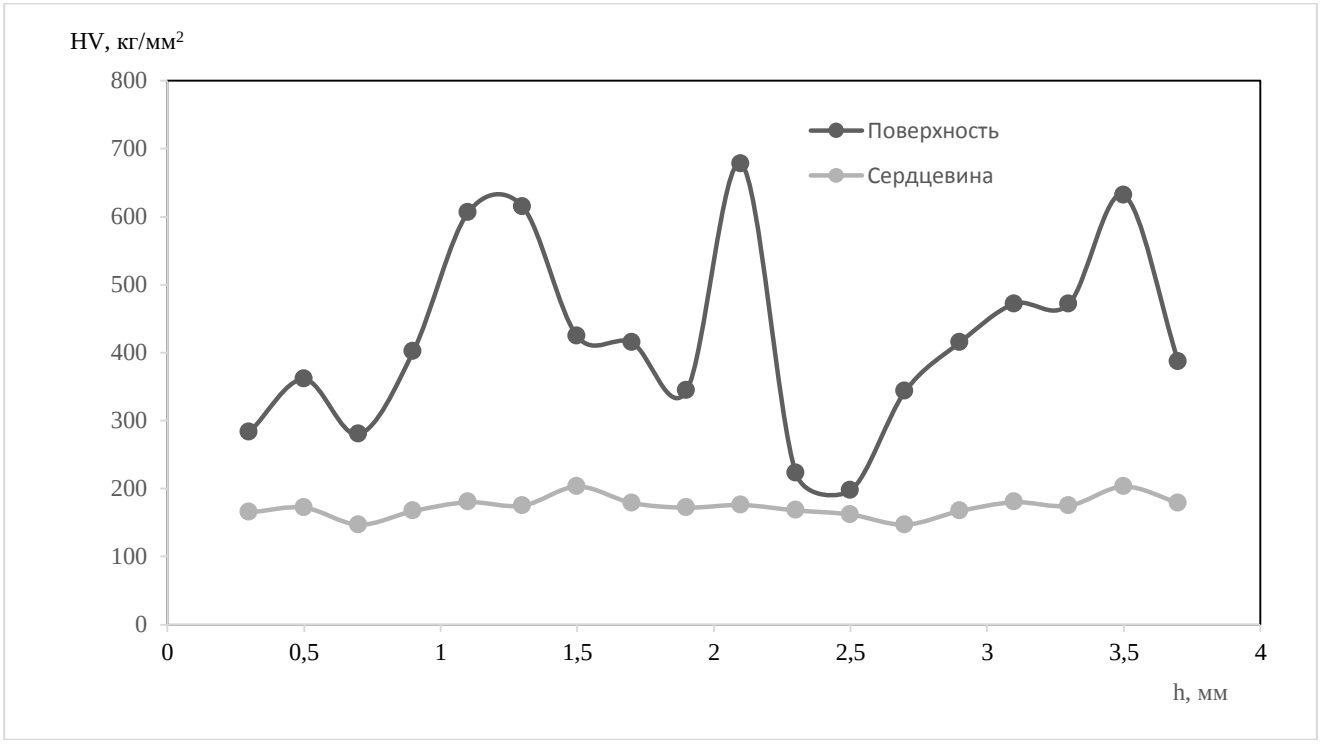


Рис. 10 Изменение микротвердости по длине образца из Стали 35

Волнообразное изменение значение микротвердости связано с особенностями проведения электромеханической обработки. При желании, подобрав соответствующие параметры обработки, можно избавиться от подобного эффекта.

Группы измерений микротвердости вглубь образца также имеют волнообразный характер вблизи поверхности, но затем твердость равномерно опускается до исходного значения.

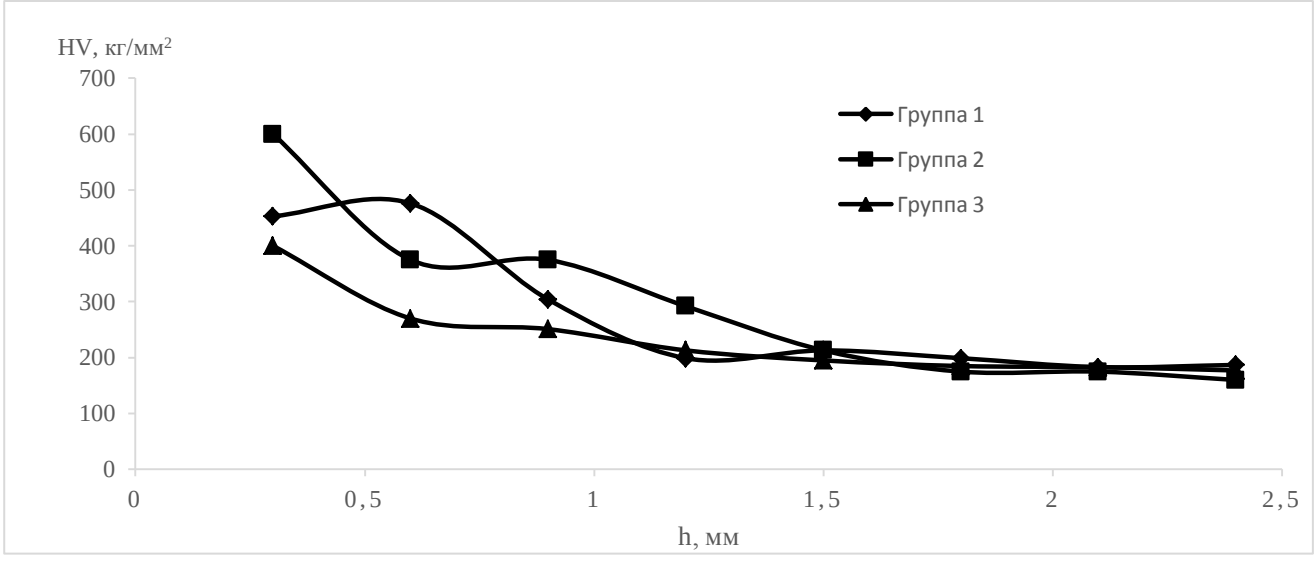


Рис. 11 - Изменение микротвердости образца из Стали 35 по глубине

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают высокую эффективность и перспективность предложенного метода упрочнения внутренних поверхностей деталей. При электромеханической обработке происходят сложные физико-механические процессы. В поверхностном слое происходят одновременно структурные изменения, фазовые превращения и химические реакции. Сложность процессов, проходящих в ходе высокоэнергетического температурно-силового воздействия, требует дальнейших исследований.

Литература

1. *Аскинази Б.М.* Упрочнение и восстановление деталей машин ЭМО. 3-е изд. перераб. и дополн. – М.: Машиностроение, 1989. –197 с.
2. *Федоров С.К., Федорова Л.В.* Нагрев и давление улучшат поверхность. - За рулем. 1998, №9, с. 175
3. *Рыжов Э.В., Суслов А.Г.* и др. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. – М.: Машиностроение, 1979. –176 с.
4. *Густов Ю.И., Федоров С.К., Федорова Л.В.* Электромеханическая закалка исполнительных поверхностей длинномерных цилиндрических деталей. – Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. №1 2007, с.42-435.
5. *Федоров С.К., Федорова Л.В.* Электромеханическая обработка. РИТМ – 2012 – №2 (70), с. 14-16.
6. ГОСТ 2999-75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. Введ 1976-01-07. М. : Изд-во стандартов, 1986. 31 с.

УДК 669.716:621.785

СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ДИФФУЗИОННОЙ ЗОНЫ, СФОРМИРОВАННОЙ ПРИ КОНТАКТНОМ ПЛАВЛЕНИИ НА МЕЖСЛОЙНОЙ ГРАНИЦЕ БИМЕТАЛЛА МЕДЬ М1 + ТИТАН ВТ1-0*

Анна Андреевна Чешева [(1)], Виталий. Павлович Кулевич [(2)], Юлия Игоревна Бондаренко[(2)],
Магистр 1 года [(1)],студент 3 курса [(2)],
кафедра «Материаловедение»,
Волгоградский государственный технический университет,

Научный руководитель: В.Г. Шморгун [(1)] ,О.В. Слаутин [(2)]
доктор технических наук, профессор [(1)], кандидат технических наук, доцент [(2)]
кафедры «Материаловедение»

Исследованы структура и фазовый состав диффузионной зоны, сформированной в присутствии жидкой фазы на межслойной границе медно-титанового композита, полученного сваркой взрывом.

В работах [1-4] показано, что нагрев слоистых металлических композитов систем (Ni-Al, Ti-Al, Ti-Cu и др.) выше температуры эвтектического превращения приводит к одновременному протеканию двух процессов - плавления и реактивной диффузии. В результате на границе раздела слоев формируется диффузионная зона, структура и фазовый состав которой контролируется температурно-временными условиями термообработки (ТО).

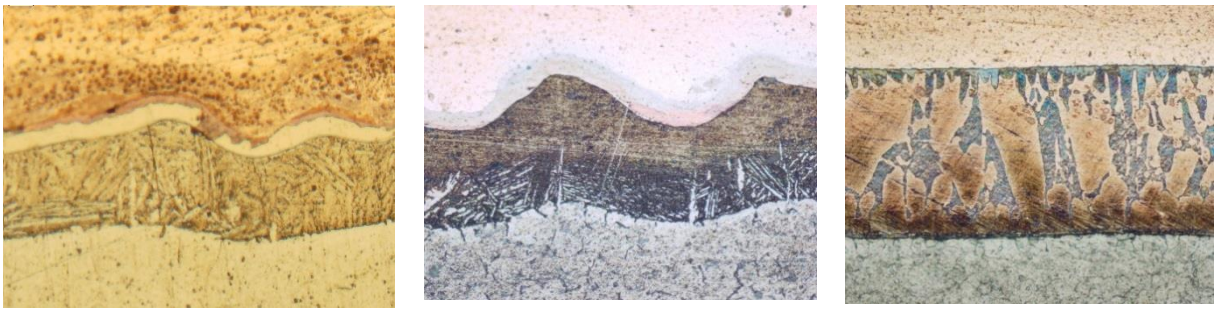
Проведенные нами исследования показали, что контактное плавление в системе Ti-Cu начинается при температуре выше 900°С (рис 1). Поэтому исследование структуры и свойств межслойной границы сваренного взрывом биметалла медь М1

(4мм)+титан ВТ1-0 (4 мм) проводили после его ТО 900 – 980°С с различными временами выдержки.

Размер диффузионной зоны определяли с помощью микроскопа OLYMPUS BX 61 на грани шлифа, нормальной к поверхности раздела. В каждом случае проводили не менее 20 измерений, что позволило получить величину ошибки ± 0,4мкм.

Измерения микротвердости проводили по стандартной методике на приборе ПМТ-3 под нагрузкой 50 грамм.

Рентгеновские съемки выполняли на дифрактометре ДРОН-3 в излучении медного анода. Расшифровку дифрактограмм проводили путем сравнения полученных значений межплоскостных расстояний с табличными данными картотеки ASTM для каждой из фаз.



а б в

Рис. 1. Микроструктура зоны соединения в биметалле М1+ВТ1-0 после ТО при температуре 850 (а) и 880°С (б), 1ч и 900°С (в), 5 мин (х500)

На рисунке 2 представлены результаты экспериментальных данных, отражающих зависимость толщины диффузионной зоны от режимов нагрева. Их анализ показывает, что с увеличением времени выдержки прослойка растет до тех пор, пока весь титановый слой не трансформируется в диффузионную зону. Интенсивность взаимодействия определяется, в основном, температурой нагрева.

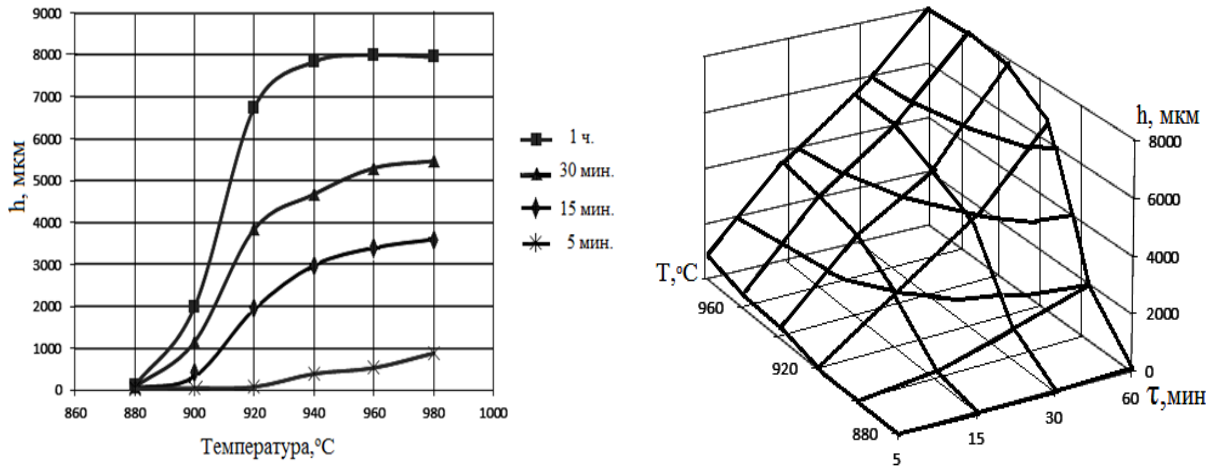


Рис. 2. Влияние режимов ТО на размер диффузионной зоны, образующейся на границе титан – медь

В результате ТО в меди происходят структурные изменения, связанные с увеличением размера зерна во всем диапазоне исследованных температур (рис.3.), что в свою очередь отражается на значениях микротвердости (рис.4). В титановом слое вследствие нагрева выше температур $\alpha \rightarrow \beta$ превращения, после охлаждения формируется игольчатая структура (рис.3. б, в) твердого раствора переменной концентрации, что сопровождается соответствующим изменением микротвердости (рис.4).

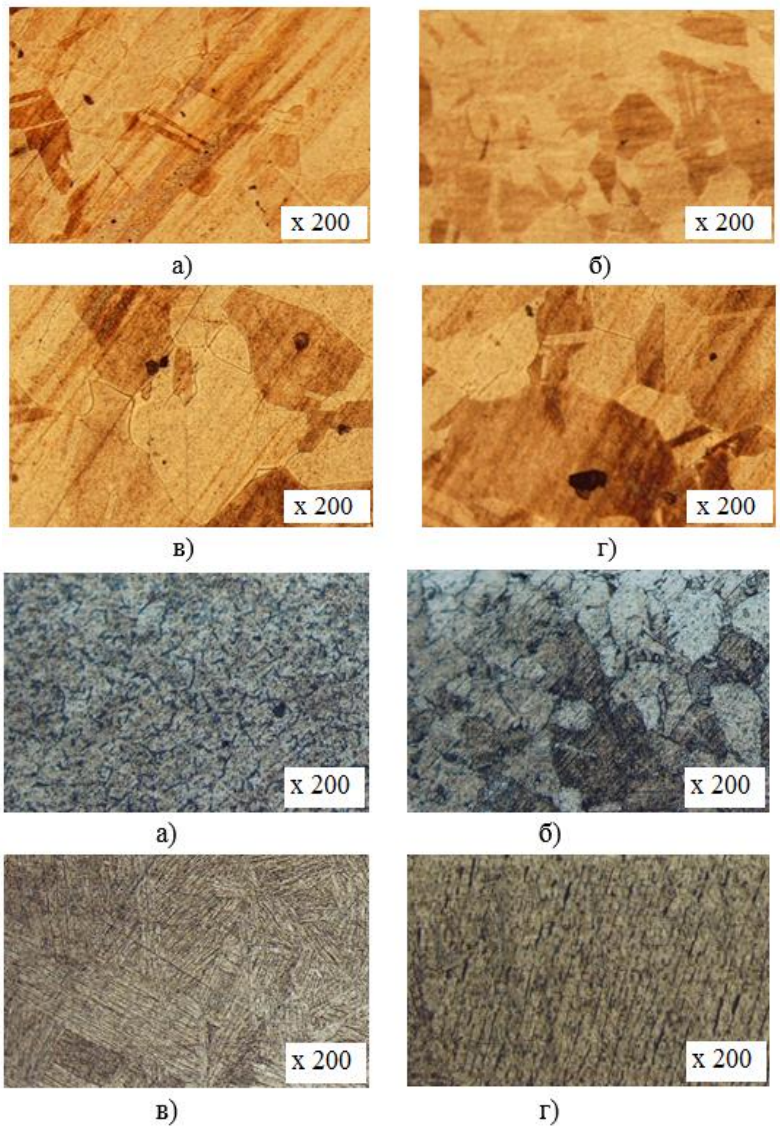


Рис. 3. Микроструктуры меди и титана М1 и ВТ1-0 после ТО при температуре 880 (а), 900 (б), 940 (в) и 980 (г) °С

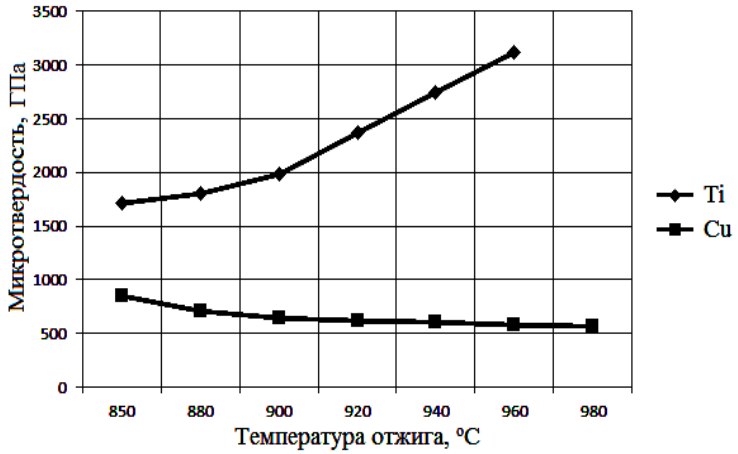


Рис.4. Характер изменения микротвердости меди и титана М1 и ВТ1-0 в зависимости от режимов термической обработки

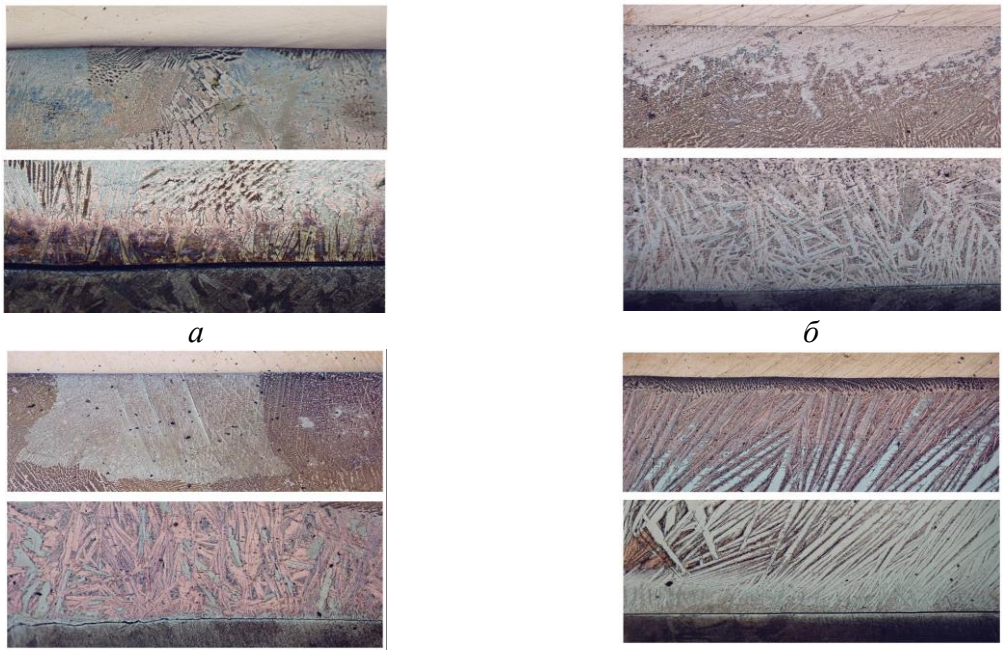
Структура диффузионной зоны в ее поперечном сечении неоднородна (рис. 5, 6). У границы с титаном значения твердости в среднем в полтора раза выше, чем у границы с

медью (рис.7). При переходе от одной структурной составляющей к другой наблюдается достаточно большой разброс значений микротвердости (до 0,8 ГПа).



а (х100) *б* (х100) *в* (х50)

Рис. 5. Микроструктура диффузионной зоны в биметалле М1+ВТ1-0 после ТО 900°С в течении 15 (а), 30 (б) и 60 (в) мин



а *б*

в *г*

Рисунок 6. Микроструктура диффузионной зоны в биметалле М1+ВТ1-0 после ТО в течение 15 мин при температуре 920 (а), 940 (б), 960 (в) и 980 °С (г) (х50)

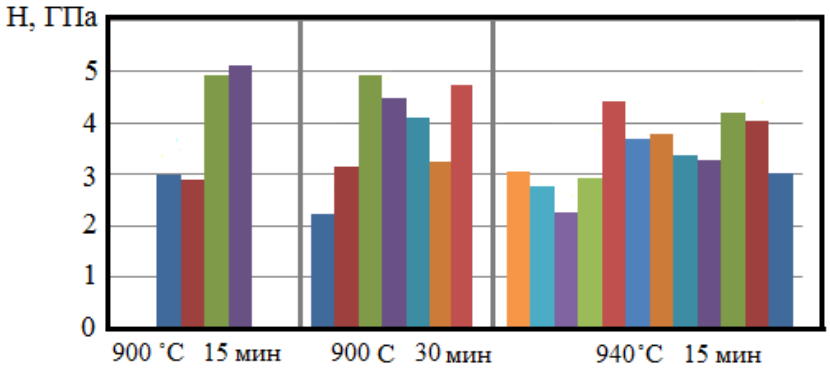


Рис. 7. Распределение микротвердости в поперечном сечении диффузионной зоны (от меди к титану)

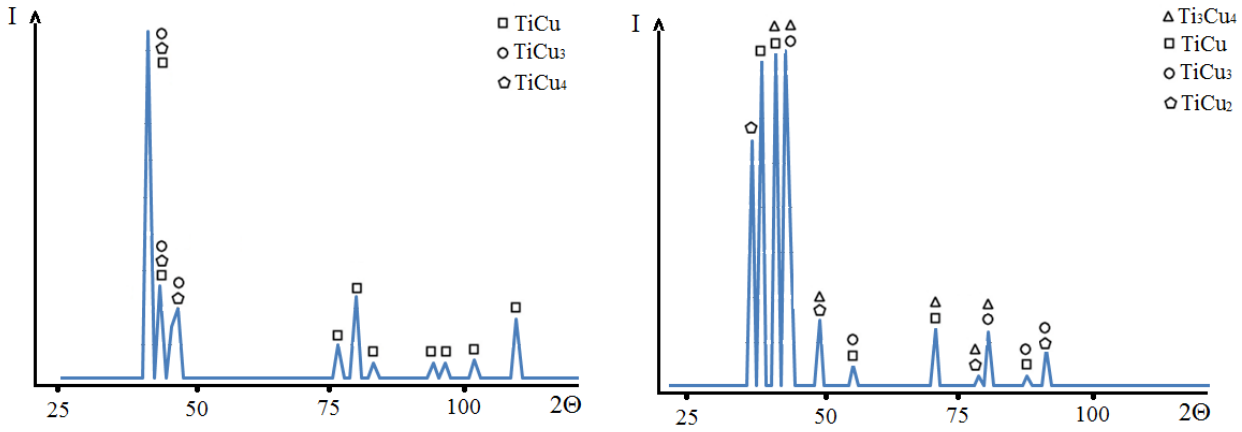
Сопоставление массовой доли прореагировавших компонентов (оценивали по изменению толщины соответствующего слоя) с диаграммой состояния медь-титан [5]

позволило в первом приближении оценить фазовый состав диффузионной зоны. Результаты такой оценки представлены в таблице 1. Их анализ свидетельствует о том, что состав диффузионной зоны должен меняться в зависимости от температурно-временных режимов ТО.

Таблица 1.Оценка фазового состава по количеству прореагировавших компонентов

Температура	Время	Исходная толщина	Прореагировавшие компоненты		Cu / Ti	Фазовый состав согласно [4]
°C	мин	мм	Cu, мм	Ti, мм	об.%	
900	15	4+4	0,87	0,086	91/9	(Cu) + $TiCu_4$
	30		0,959	0,196	83/17	$TiCu_2$ + $TiCu_4$
	60		0,497	1,49	25/75	αTi + Ti_2Cu
920	15		1,453	0,484	75/25	$TiCu_2$ + $TiCu_4$
940	15		2,0	0,985	67/33	Ti_2Cu_3 + $TiCu_4$
960	15		1,598	1,802	47/53	Ti_3Cu_4 + TiCu
980	15		1,548	2,052	43/57	Ti_3Cu_4 + Ti_2Cu_3 + TiCu

Расшифровка дифрактограмм после рентгеновской съемки со стороны диффузионной зоны, механически отделенной от слоя титана, показала, что структура и фазовый состав диффузионной зоны зависит от температурно-временных режимов ТО. Так после ТО (900°С) в составе диффузионной зоны идентифицируются линии, соответствующие интерметаллидам TiCu, $TiCu_3$ и $TiCu_4$, а при 960°С - Ti_3Cu_4, TiCu, $TiCu_3$ и $TiCu_2$ (рис. 8).



а *б*

Рис. 8. Дифрактограммы, полученные после съемки с поверхности диффузионной зоны, после ТО 900 (а) и 960°С (б) в течении 15 мин

Таким образом, проведенные нами исследования показали, что диффузионное взаимодействие в присутствии жидкой фазы приводит к исчезновению сформировавшегося при сварке взрывом на границе раздела титанового и медного слоев волнового профиля и формированию на поверхности меди интерметаллидного покрытия, структура и фазовый состав которого определяются температурно-временными режимами термообработки.

**Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (13-08-00066 А и 13-08-97025 р_поволжье_а) и Министерства образования и науки РФ*

Литература

1. *Kundu. S.* Diffusion bonding of commercially pure titanium to 304 stainless steel using copper interlayer / S. Kundu, M. Ghosh, A. Laik, K. Bhanumurthy, G.B. Kale, S. Chatterjee // Materials Science and Engineering - 2005 (A 407). p. 154–160.
2. *Bratanich. T. I.,* "Kinetics of destructive hydrogenation of Ti2Cu and TiCu intermetallides / T. I. Bratanich, V. V. Skorokhod, and O. V. Kucheryavyi // Powder Metall. Met. Ceram - 2010, №6, p. 330–338.
3. *R.K. Shiue, S.K. Wu, C.H. Chan, and C.S. Huang:* Infrared braz-ing of Ti–6Al–4V and 17-4 PH stainless steel with a nickel barrier layer. Metall. Mater. Trans. A37,2207 (2006).
4. *Шморгун В.Г.* Формирование структуры диффузионной зоны СИК системы Ni-Al в присутствии жидкой фазы / Шморгун В. Г., Трыков Ю. П., Богданов А. И., Арисова В. Н // № 5(78). – Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2011.– Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. Вып. 5. с. 11-14.
5. *Lee. M.K.* Strong bonding of titanium to copper through the eliminationof the brittle interfacial intermetallics / M.K. Lee, J.G. Lee, J.K. Lee, J.J. Park, G.J. Lee, Y.R. Uhm, and C.K. Rhee // J. Mater. Res., Vol. 23, No. 8, Aug 2008, p. 2254-2263.

Секция IX

Промышленный дизайн

Председатель: **Терехова Наталья Юрьевна**
кандидат технических наук, доцент, заместитель заведующего кафедры «Промышленный дизайн» (МТ-9)

Ученый секретарь: **Резванцева Александра Борисовна**
ассистент кафедры МТ-9

УДК

ПАРАБОЛА И ЕЁ ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Федор Андреевич Загуменнов,
студент 1 курса,
кафедра «Технология приборостроения»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Т.И. Маслова,
кафедра «Инженерная графика»

Введение

Парабола является кривой, представляющей собой геометрическое место точек, равноудалённых от фокуса параболы и другой заданной прямой. Эта кривая, а также соответствующий ей в трёхмерном мире эллиптический параболоид, играют важную роль во многих физических процессах, в связи с чем нашли широкое применение и распространение во многих инженерных, технических и др. устройствах, в архитектуре. Парабола изображена на рисунке 1.

Парабола является линией конического сечения, открытие которых приписывают Менехему. Учение о конических сечениях было развито Евклидом, а также Аполлонием Пергским, который рассмотрел в своём труде все конические сечения, а также их свойства, причём труды Аполлония примечательны тем, что они представляют собой синтез аналитической и начертательной геометрии.

Важным свойством параболы является то, что любой предмет в поле тяготения перемещается по параболе при отсутствии сопротивления воздуха или в условиях, когда мы этим фактором можем пренебречь.

Наиболее значимым является т.н. «оптическое свойство» параболы - пучок лучей, параллельных оси параболы, отражаясь в параболе, собирается в её фокусе. Из-за этого параболе нашли самые различные применения в различных оптических устройствах, от ламп и до телескопов. В силу корпускулярно-волновой природы света, оптические свойства параболы были переложены на составные части различных радиопередающих устройств, например, узконаправленные, спутниковые антенны и проч.

В данной работе рассмотрены как рядовые примеры применения параболы, так и примеры применения параболы в новых технологиях. Детально рассмотрена роль параболы в технологиях освещения в компьютерной графике.

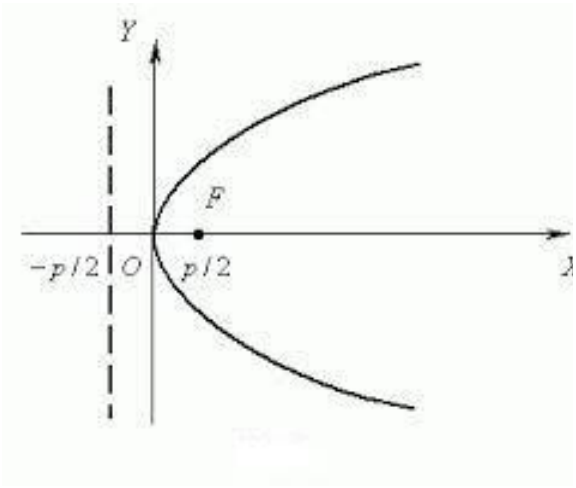


Рис.1.

Практическое применение параболы

1) Оптические свойства параболы

Сферическое вогнутое зеркало имеет существенный недостаток. Если на всю поверхность зеркала падает пучок параллельных лучей, то лучи, отраженные от краев зеркала, не пересекаются на оптической оси в одной точке. Если же направлять пучок параллельных лучей только на ту часть поверхности, которая расположена вблизи полюса зеркала, то зеркало окажется неполноценным отражателем света, так как только часть его поверхности используется для отражения света. Широкое применение нашли параболические зеркала и рефлекторы, так как параллельный пучок света собирается в фокусе параболы, что даёт возможность использовать это в самых различных целях. Логично предположить, что возможно провести этот опыт наоборот – поместить пучок света в фокус параболы, что позволит рассеивать свет параллельным пучком, что нашло применение в самых различных световых устройствах. Любой практично спроектированный светильник представляет собой приближённую параболу. Во всех подобных устройствах это применяется для «концентрации» света в одной точке, или напротив, превращение точечного источника в параллельный пучок. Прибор для создания параллельного пучка света называется коллиматор, и в своей структуре часто имеет параболические зеркала. Параболические зеркала также широко используются в транспорте, например, в электропоездах. В обратную сторону, то есть, при фокусировке всех лучей в одной точке, возможно использование данного эффекта для подогрева и даже воспламенения объектов. При фокусировке на воде после испарения возможно использование турбины для выработки электроэнергии, что уже успешно применяется, например, на солнечной электростанции, разработанной в Иране, которая при помощи параболических коллекторов вырабатывает примерно 250 кВт, что, тем не менее, является весьма небольшой мощностью

Также, парабола нашла применение в виде контактных линз.

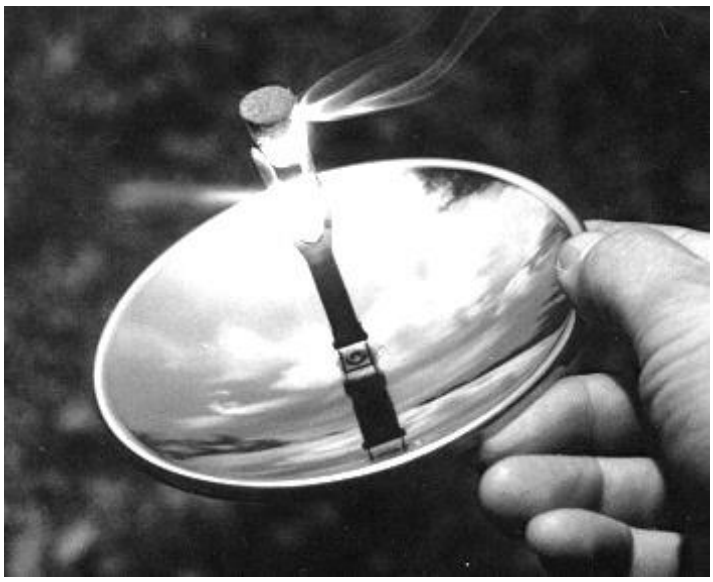


Рис. 2. Параболическое зеркало

2) Парабола как космическая траектория перемещения

Кеплеровская орбита с эксцентриситетом равным 1 представляет собой параболическую траекторию, по которой могут двигаться различные космические объекты. Часто возникает ситуация, когда нужно предсказать движения различных космических тел, например, с целью выяснения безопасности запуска очередного спутника, или другого космического научного объекта. Поэтому изучение физических и математических свойств параболы необходимо даже для элементарного моделирования.

Ещё одно применение параболической траектории связано с космическим применением – при движении по неё самолётов, внутри моделируются условия невесомости, что способствует подготовке космонавтов.

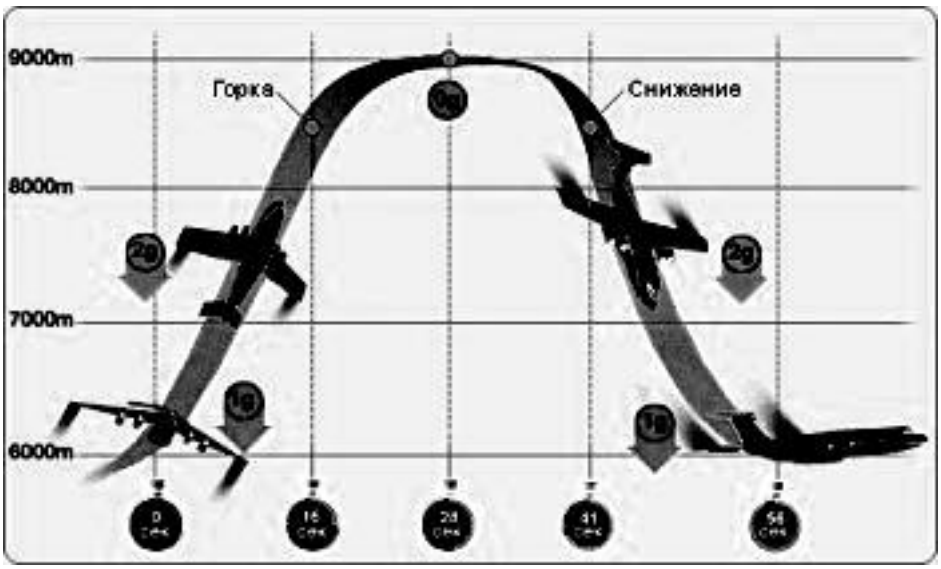


Рис. 3 Траектория самолёта для создания условий невесомости

3) Парабола в медицине

В СССР были разработаны специальные параболические нагреватели, состоящие из лампы и параболического зеркала, которые были предназначены для интенсивного прогрева участка тела. Фотография данного устройства приведена на рис.4.1-4.2.

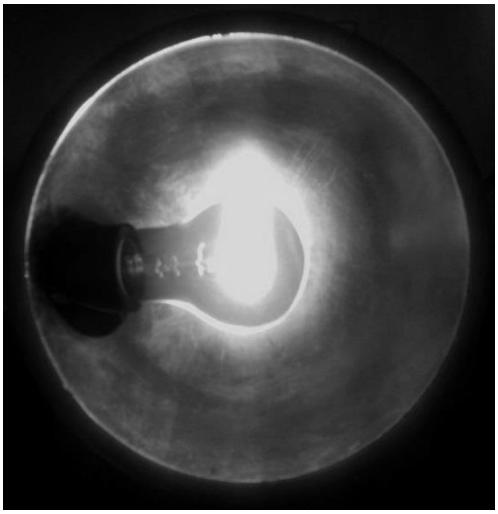


Рис 4.1

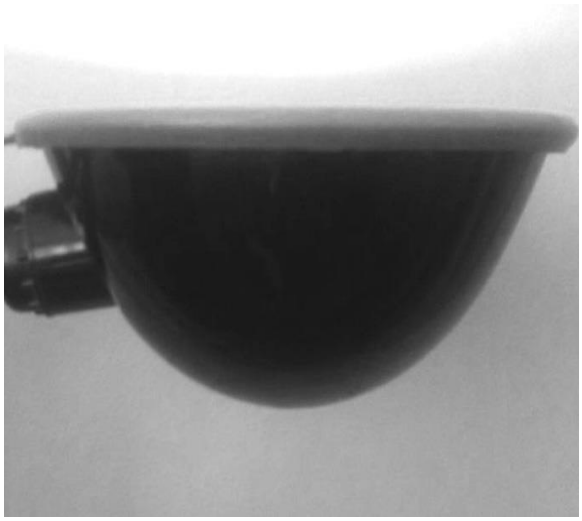


Рис 4.2

4) Парабола как антенна

Так как свойства параболы применимы как для света, так и радиоволн, наибольшее распространение парабола нашла в виде зеркальных антенн(«тарелок»).

Спутниковая антенна — зеркальная антенна для приёма (или передачи) сигнала или размещенная на спутнике.

Параболические антенны являются самыми распространёнными спутниковыми антеннами (их обычно и называют спутниковыми). Спутниковые антенны имеют различные типы и размеры. Наиболее часто в мире подобные антенны используются для приёма и передачи программ спутникового телевидения и радио, а также соединения с Интернетом.

Для изготовления спутниковых антенн в основном используют сталь и дюралюминий, причём стальные антенны ниже по стоимости, а дюралюминивые меньше по массе. Поэтому, из последнего материала обычно делают большие антенны, более 1,2 метра в диаметре. Также, для облегчения конструкции и снижения парусности, зеркало антенны делают из перфорированного листа.

Антенна может быть изготовлена из металлической сетки, натянутой на металлические ребра. Такие антенны используются в качестве раскрывающихся переносных антенн.

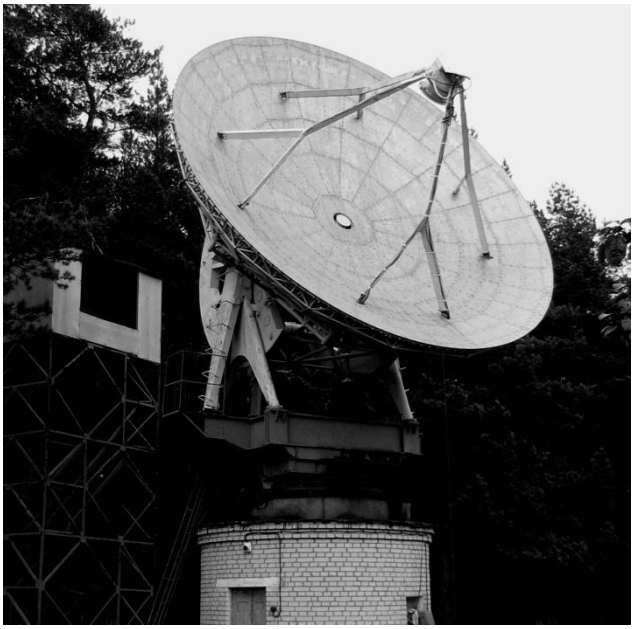


Рис. 5. Радиотелескоп МГТУ им. Н.Э. Баумана.

5) Парабола в массовой культуре

Параболические зеркала используют для зажигания олимпийского факела при эстафете олимпийского огня, в том числе во время олимпиады 2014 года, при зажигании Олимпийского огня в Греции. Из видеозаписи, представленной в новостной ленте, видно, что для зажигания факела в фокусе параболического зеркала требуется всего лишь несколько секунд. Кадр из видео представлен на рисунке 6.1.

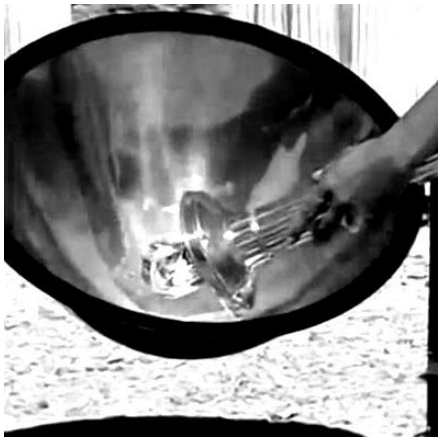


Рис.6.1. Параболическое зеркало и олимпийский факел

В известном научно-фантастическом фильме СССР «Гиперболоид инженера Гарина» возникает сомнение в наличии в самой конструкции этого фантастического оружия гиперболоида как поверхности вращения, а в фильме, тем не менее, показана конструкция, использующая в своём составе эллиптический параболоид (рис.6.2). Также,

сам «гиперболоид» установлен на вышке, имеющей форму параболы, что видно на рис.6.3.



Рис. 6.2.

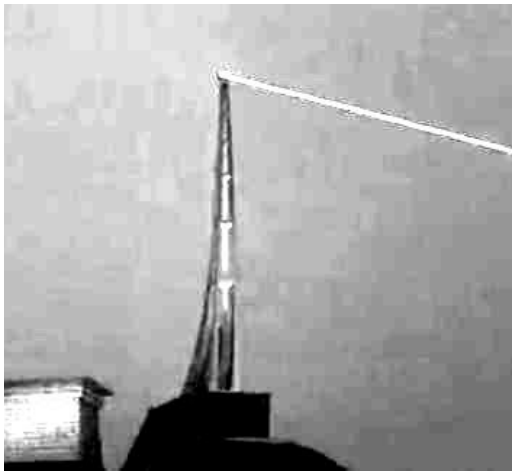


Рис. 6.3.

1) Парабола как сечение в коническом источнике освещения.

Оптические свойства параболы нашли своё применения и в моделировании источников света, например, в трёхмерных компьютерных приложениях, где «прожекторный» (англ. spotlight) источник света использует квадратичное затухание света. Кроме того, сам контур такого типа источника света ограничен двумя конусами, в связи с чем граница сечения пространства, освещаемые источником света, представляют собой конические сечения, в том числе и параболу.

В табл. 1.1-1.2 приведён код реализации подобного типа освещения на языке CG(C for Graphics)

Таблица 1.1 – Графический шейдер освещения. Код аттеньюации (затухания).

```
f lightDist = length(lightPos0.xyz - IN.wp.xyz) / lightAtt0.r;
f ila = lightDist * lightDist; // квадратичное затухание
f la = 1.0 - ila;

t3 light0C = diffuseContrib * la * spot;
```

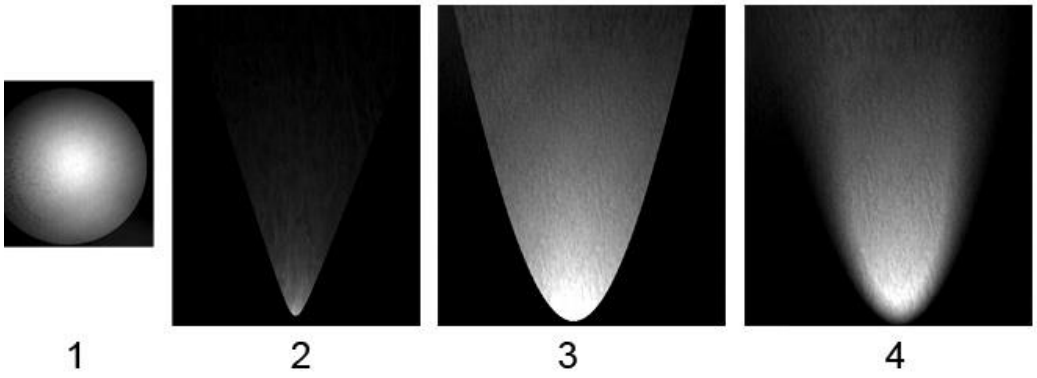
Таблица 1.2 – Графический шейдер освещения. Код конуса освещения

```
t spot = (spotlightParams.x == 1 &&
  spotlightParams.y == 0 &&
  spotlightParams.z == 0 &&
  spotlightParams.w == 1 ? 1 :
  saturate(
     (dot(ld0, normalize(-IN.sdir)) - spotlightParams.y) /
     (spotlightParams.x - spotlightParams.y))); //конус освещения
```

В привёденном коде в табл. 1.1 вычисляется расстояние от камеры до источника света, вычисляется квадратичное затухание, и чуть позже коэффициент границы фигуры накладывается на материал объекта в качестве огибающей. Результатом данной операции является материал, освещение на котором представляет собой проекцией параболоида «снизу», то есть, в случае, если посмотреть на параболоид снизу вверх.

В коде на табл. 1.2. вычисляется конус освещения фонарного источника света. Как следствие, мы имеем самые различные сечения конуса при наложении на объект. Код

представляет собой формулу нахождения угла между вектором направления источника света и угла конуса через скалярное произведение, и линейную интерполяцию от полностью освещенного до тёмного участка конуса. Результат использования данного источника света представлен на рис.7.1-7.4. На рис. 7.1 изображено эллиптическое сечение, где главным свойством является действие кода из табл.1.1 – квадратичным затухания. Рис. 7.1-7.2 представляют собой 2 конических сечения – пересекающиеся прямые, для достоверности, что мы имеем дело с конусом, и параболу – объект нашего исследования. На рис. 7.4 изображено возможное применение параболы в качестве модели источника света. Для этого конус разделяется на 2 части, и осуществляется переход от одной параболы к другой, с целью плавного, «фонарного» света. Мы можем наблюдать схожий эффект и в реальном мире. Изображения получены при помощи движка Run3, автором которого я являюсь. Моделирование данного источника света в других программах осуществляется аналогично, так как основой являются 2 конуса света.



:унок 7.1-7.4. Конические сечения источника света с параболическим затуханием

Заключение

Парабола является эффективным инструментом в руках инженера, с помощью неё возможно решение широкого спектра технических задач в различных устройствах и приборах. Кроме того, парабола, как коническое сечение уже заложена в принцип работы многих технологий, например, как было рассмотрено выше, в конусный фонарный источник света.

Парабола является лишь геометрической кривой, но имеет массу приложений из-за её необычных свойств.

Литература

1. Канатников А.Н., Крищенко А.П. Аналитическая геометрия. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.
2. NVidia CG Tutorial. – Электронный ресурс. Режим доступа: http://http.developer.nvidia.com/CgTutorial/cg_tutorial_chapter01.html - Проверено 21.02.2014
3. SSAO & Per-Pixel Shading Example. – Электронный ресурс. Режим доступа: http://ogre3d.org/forums/viewtopic.php?f=11&t=47927 - Проверено 21.02.2014
4. Парабола как космическая траектория. – Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.kosmos-inform.ru/pe/parabola.html - Проверено 21.02.2014
5. С.А.Фролов, М.В. Покровская В поиска начала. Рассказы о начертательной геометрии. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.

УДК 658.512.23

СТРУКТУРНАЯ ОТКРЫТОСТЬ ВЕЩИ НА ПРИМЕРЕ УЛИЧНОГО СВЕТОДИОДНОГО СВЕТИЛЬНИКА

Мария Сергеевна Коваленко,
студентка 6-го курса,
кафедра «Промышленный дизайн»
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: И.Н. Лысенко,
ведущий преподаватель кафедры «Промышленный дизайн»

Мы скучаем по золотому времени механики, когда мы открывали крышку и видели весь процесс работы. Так эти вещи становились нам более понятными и близкими. Сейчас миром правят электроника и программное обеспечение. Нам не ясно, почему наш телефон работает или перестает работать, мы просто говорим: «Перезагрузи, вдруг поможет».

Рассмотрим старый телефон, каким пользовались люди до революции. У него было место, куда надо говорить, и место, откуда надо слушать. Мы могли догадаться, зачем он нужен, его структура подчинена функции. Если бы пользователям того телефона показали современный смартфон, они бы предположили, что это разделочная доска.

Бытовая техника в нашем доме уже давно живет своей жизнью, как будто искусственный разум уже создан. Эти вещи могут быть умными и удобными, но они нам непонятны и от этого чужды. Может быть, именно в понятности секрет успеха механических часов в наше время, хотя уже давно есть более легкие, точные, многофункциональные электронные часы.

Мы любим ясность и к ней стремимся.

Я не призываю совсем отказаться от «умных» электронных вещей, я говорю лишь о том, что понятность - приятное свойство вещи.

Распространенный сегодня подход в конструировании вещи заключается в следующем: нужно скрыть её технические, «некрасивые» части под гладкой оболочкой, за которой уже совсем не видно, что это за вещь. Примеров вокруг нас множество: двигатель под бампером машины, цоколь лампочки, печатающая головка в принтере, матрица в цифровом фотоаппарате.

Я же предлагаю сделать вещь более открытой, показать пользователю, как она работает, разделить с ним технологические тайны и сделать его нашим соучастником. Это своеобразная игра с пользователем, в которой он прикладывает определённые усилия и узнаёт что-то новое об окружающем мире.

Таким образом, мы можем не прятать технические части, а делать их активными участниками композиции.

Эта мысль не нова. Например, она лежит в основе архитектурного стиля “Хай Тек”, когда все коммуникации здания (электричество, отопление, канализация) не прятали в толще стен, а демонстративно вывешивали наружу и раскрашивали разными цветами в зависимости от назначения.

Описанный выше принцип я назвала принципом структурной открытости вещи. Исходя из него я проектировала уличные светодиодные светильники, показанные на рисунках 1 и 2.

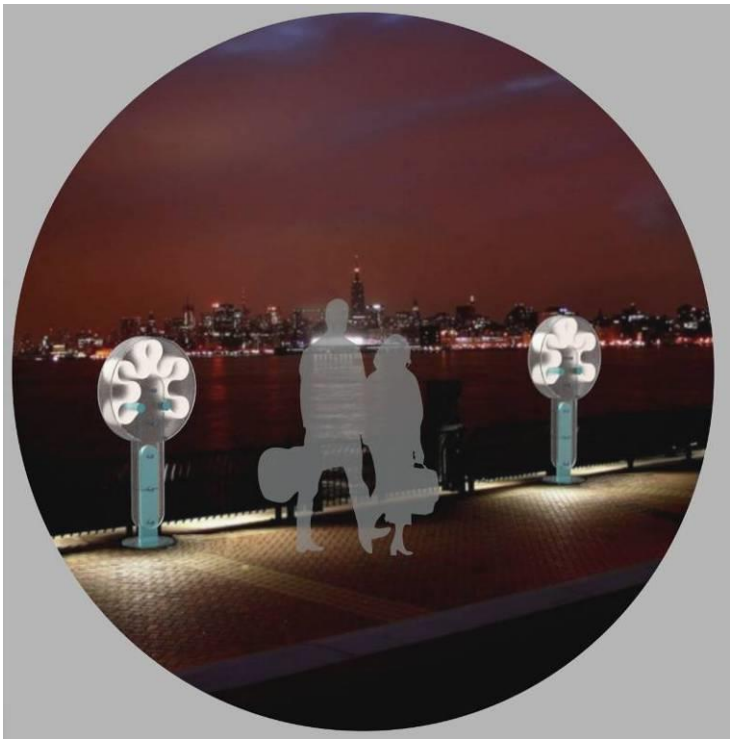


Рис.1

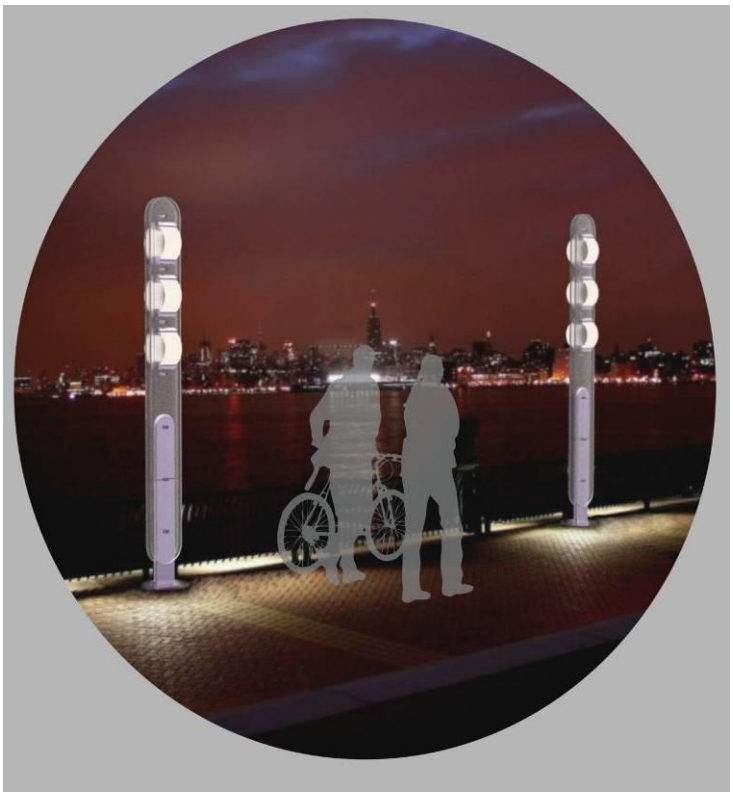


Рис.2

Эта пара светильников – низкий и высокий – предназначены для городских улиц и парков.

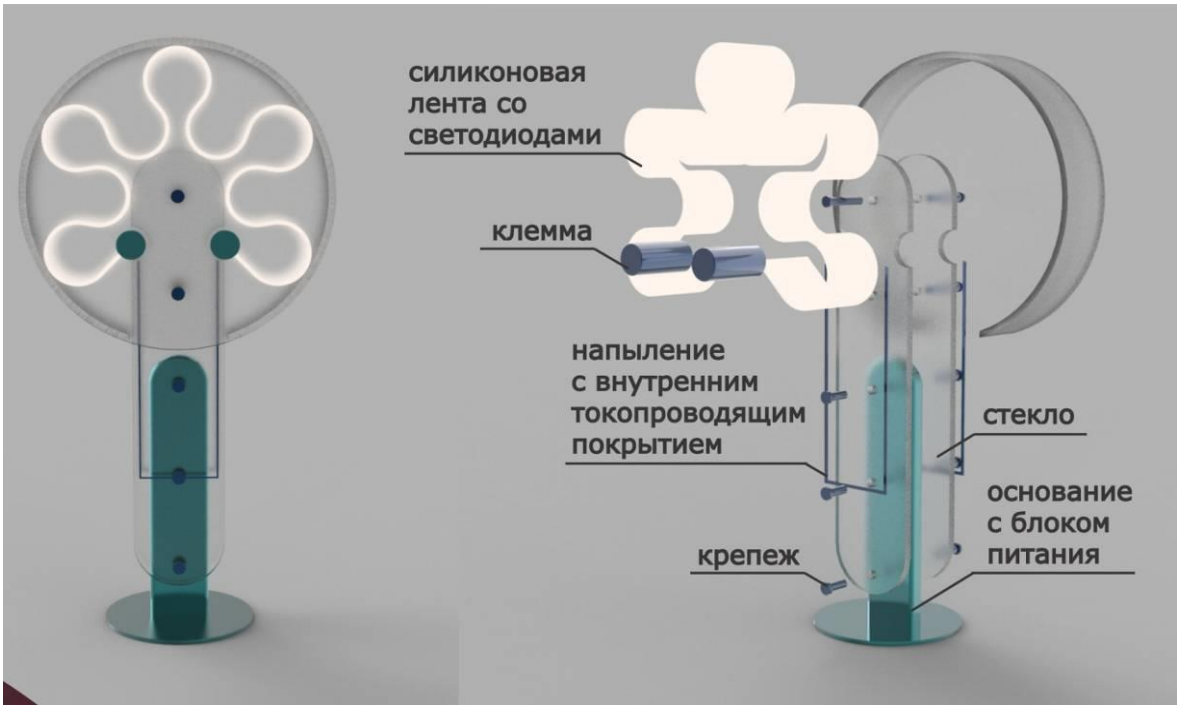


Рис.3

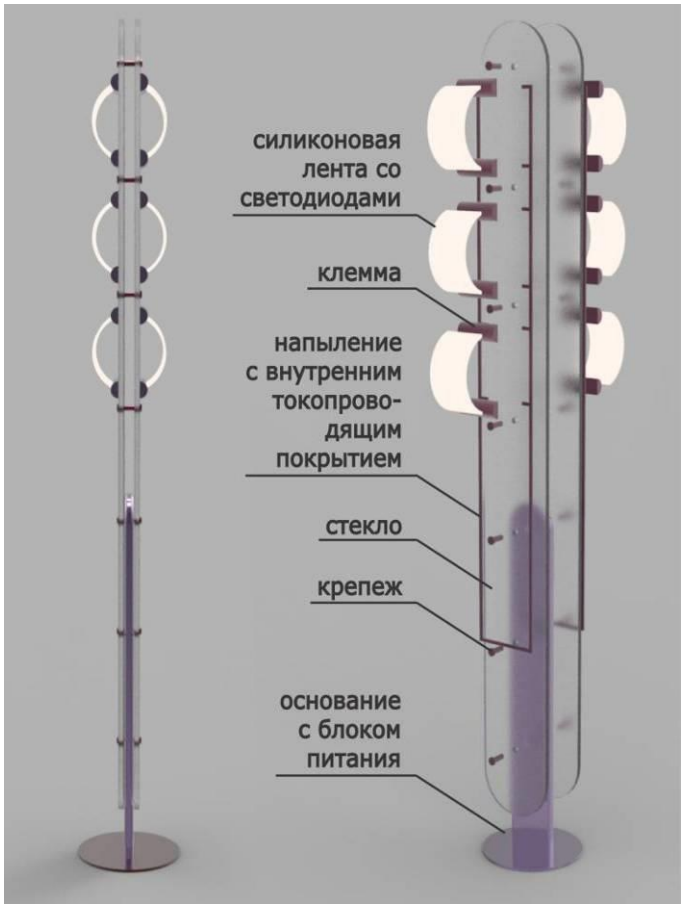


Рис.4

В светильниках использована светодиодная силиконовая лента с матовым покрытием, которая выполняет роль рассеивателя (рис.3,4). Сложная изогнутая форма этой ленты уже показывает всем, что светильники работают на светодиодах, так как ленту такой формы нельзя получить, используя другие источники света. То есть нам сразу понятно, что эти светильники – светодиодные.

Светодиодная лента крепиться к клеммам. Клеммы в данном случае – большие яркие цилиндры, являющиеся важной частью композиции. Мы понимаем - питание светодиодных лент осуществляется через эти клеммы. Электричество к клеммам подается с помощью токопроводящего покрытия – это ещё один активный композиционный элемент. Крепеж тоже не скрыт, а выделен, поэтому мы сразу понимаем конструкцию светильников.

Кроме того, эти светильники технологичны, просты в сборке, легки в уходе, а использование светодиодов позволяет экономить энергию и делает их долговечными.

Таким образом, при проектировании светодиодных ламп мы в полной мере использовали принцип структурной открытости. Все основные элементы светильника – силиконовая светодиодная лента, токопроводящее покрытие, клеммы, крепёж – не спрятаны от пользователя, а играют важную роль в композиции. Пользователь видит, как работает светильник, откуда берётся энергия, какая технология используется для получения света, как скреплены разные части устройства. Это не закрытое устройство, где все тайны спрятаны внутри, а открытое, где пользователю всё просто и ясно. Такой светильник не только выполняет свою прямую функцию, но и вызывает интерес, привлекает внимание и заставляет задуматься об устройстве вещей. Этим и хорош принцип структурной открытости, который я и предлагаю использовать всем дизайнерам как один из методов решения стоящих перед ними задач.

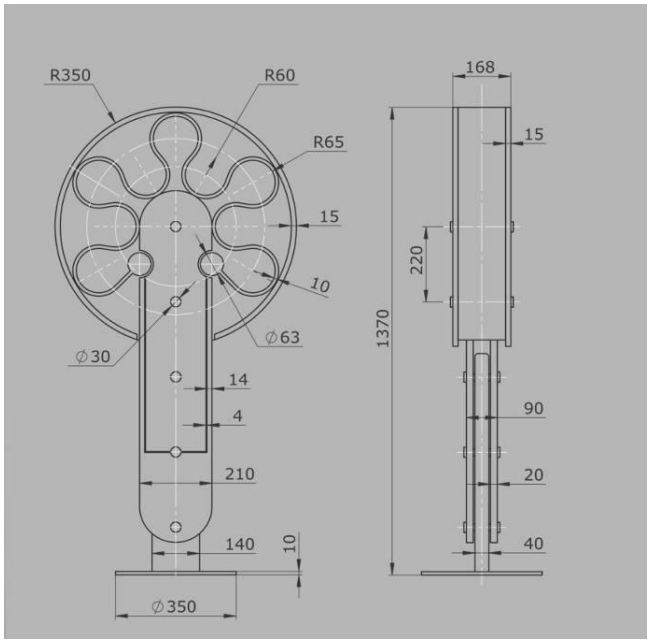


Рис.5

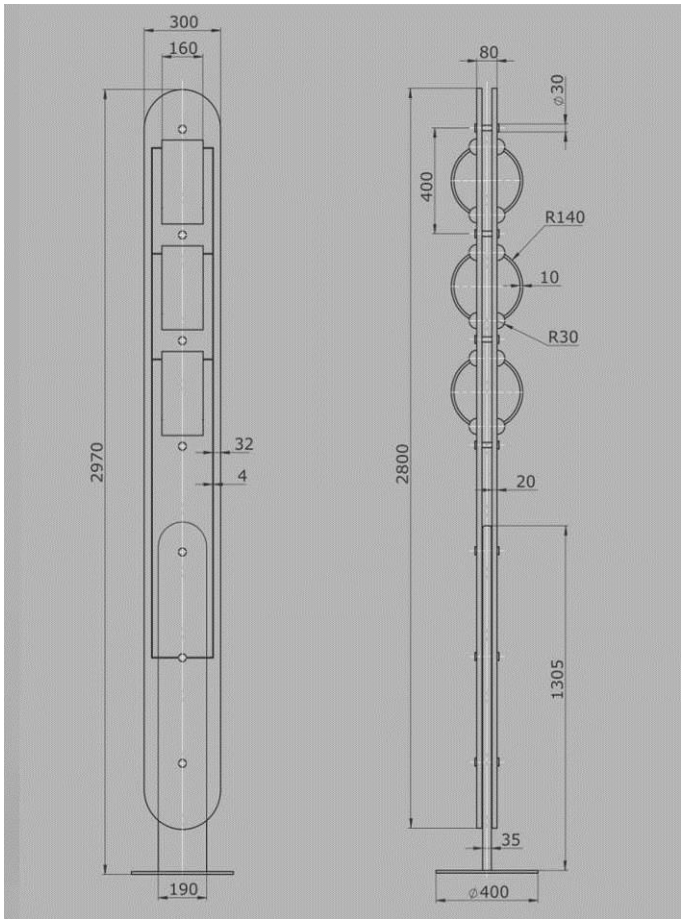


Рис.6

Литература

1. *Папанек В*. Дизайн для реального мира.- Д.Аронов, 2008.-416с.
2. *Власов В.Г*. Стили в искусстве. - Спб., 1998г.
3. www.omami.ru – О дизайне с любовью

УДК 514.758.3

ОТ ПЛОСКОГО К ОБЪЕМНОМУ: СЛОЖНЫЕ МАКЕТЫ

Акоп Ваганович. Антонян,
студент 3 курса
кафедра «Колесные машины»,
Московский государственный университет им. Н.Э. Баумана,

Научный руководитель: Т.И. Маслова, ассистент кафедры «Инженерная графика»

Ключевые слова: Макет, развертка, каркас, механизм.
Experimental model, monolayer scanning, frame, mechanism

Аннотация: В статье представлено описание изготовления сложных макетов и макетов механизмов, которые выполняются из бумаги. Некоторые выполнены вручную, а другие в программе AutoCAD (режим 2D, для ускорения скорости выполнения и повышения качества). Показаны методы и подходы, а так же различные приемы при построении макетов. Представлено каркасное макетирование - по прямой и обратной схеме. В

работе показаны примеры построения развертов вагона, кузова автомобиля и других образцов техники.

Прежде чем перейти к построению макетов сложных форм, необходимо вспомнить начальные знания по выполнению макетов простых геометрических тел. При выполнении макетов используются навыки, полученные при выполнении чертежей. Макет – объемное материальное изображение объекта, позволяющее оценить особенности проектируемого изделия (объемно-пространственную структуру, фактуру поверхности, размеры, пропорции, функционирование и т.д.). В работе показаны различные способы построения разверток сложных макетов («предсказуемой» и «непредсказуемой» формы), каркасов и механизмов. Бумага – легкий в обработке материал, поэтому макеты из бумаги делаются быстро. Именно в макете воплощается физический смысл проекта. Получаемые макеты содержат все признаки реального объекта и позволяют не только оценить внешний вид, но и имитировать различные потребительские эффекты (связанные, например, с креплением и обслуживанием), анализировать конструктивные и технологические решения. Макет можно детально осмотреть со всех сторон, составить все «за» и «против» и в конце концов представить, что же получится в результате. Каркасы применяют, когда необходимо обеспечить прочность основы макета и в то же время легкость и приспособленность к различным видам доработок, которых при макетировании в натуральную величину бывает значительно больше, чем при макетировании с уменьшением.

Базовая часть: построение разверток простых фигур

Начнём с простого примера, с *куба*. Образующие поверхности – 6 плоскостей, а точнее 6 граней, расположение которых показано на рис.1,а. Затем добавляются «поля» (элементы развёртки, благодаря которым стороны развертки соединяются между собой) (рис.1,б). И последний пункт – сборка объекта (рис.1,в,г).

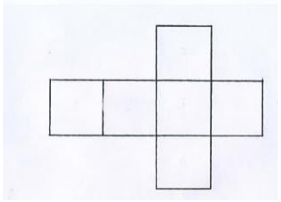


Рис.1,а. Развертка куба без «полей».

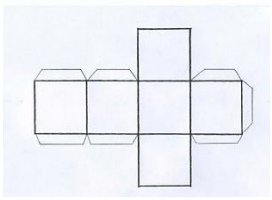


Рис.1,б. Развертка куба с «полями».

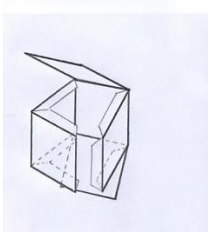


Рис.1,в. Сборка куба.

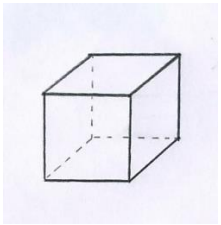


Рис.1,г. Собранный куб.

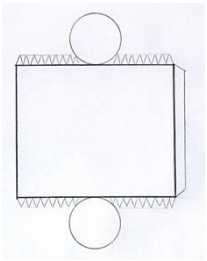




Рис.2. Процесс построения цилиндра и его сборка.

Разберём сборку *цилиндра*. Здесь поверхностей - 3, из них 2 поверхности - основания цилиндра (на развертке изображены в виде кругов) и одна боковая поверхность (прямоугольник) (рис.2).

В этом случае важно знать длину развернутой боковой стороны прямоугольника (длина окружности), которая вычисляется по формуле:

$L = 2\pi r$,

где L – длина развернутой боковой стороны цилиндра, r – радиус основания (рис.3).

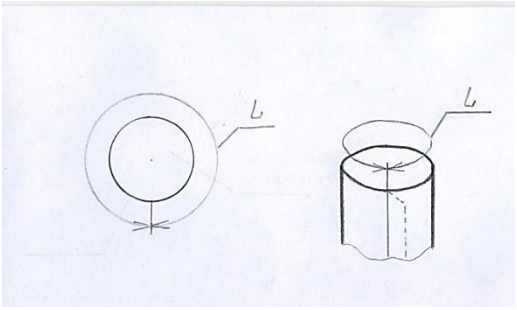


Рис.3. Обозначение длины L.

Далее так же по алгоритму сборки куба.

Конус. У нас имеется основание конуса (круг) и боковая поверхность конуса. Развертка боковой поверхности конуса представляет собой сектор круга (рис.4,б). Его-то и нужно построить, точнее, определить угол φ. Процесс расчета: построить фронтальную проекцию конуса таким образом, чтобы основание конуса проецировалось в прямую. Обозначить радиусы r и R на проекции, как показано на рис.4,а:

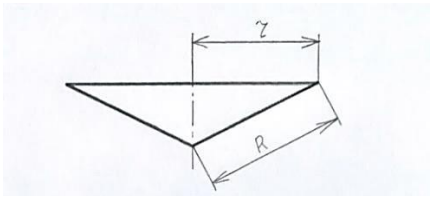


Рис.4,а. Проекция Конуса.

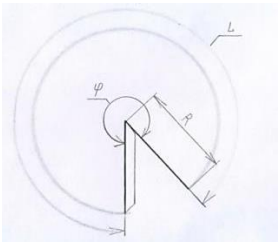


Рис.4,б. Развертка Конуса.

Рассчитать по формуле угол φ:

$L = 2\pi r$ (1),

(1) - формула для определения длины окружности. Затем подставить значение L в формулу (3), которая выводится из (2):

$L = \frac{\pi R \varphi}{180}$ (2)

$\varphi = \frac{L180}{\pi R}$ (3),

где r – радиус основания, R – длина образующей конуса, или радиус сектора.

Построение *сферы*. Процесс построения развертки: сначала необходимо построить фронтальную и горизонтальную проекции сферы, причем сферу (октант сферы) желательно сделать граненой (рис.5,а).

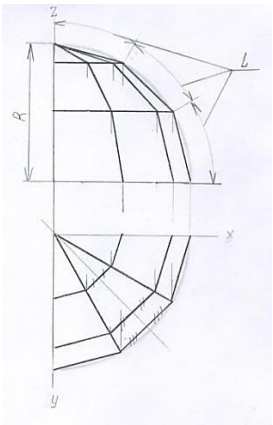


Рис.5,а. Проекции образа сферы.

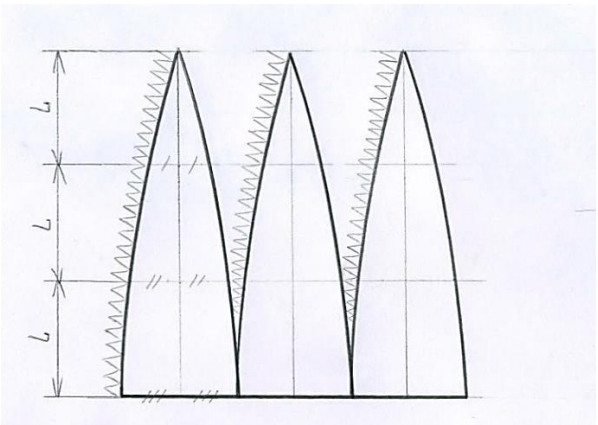


Рис.5.б. Развертки сферы.

На горизонтальной плоскости проекций проводится серединный перпендикуляр к стороне многоугольника, который является приближенной формой окружности (экватора

сферы). Затем строится развертка октанта сферы - «лепестки», высота которых (на развертке) равна величине четверти длины главного меридиана сферы. Далее нужно достроить необходимое количество «лепестков».

Для создания объекта общего вида необходимо пользоваться пересечением поверхностей простых объектов.

«Сквозное-наружное» показано на рис.7,а:

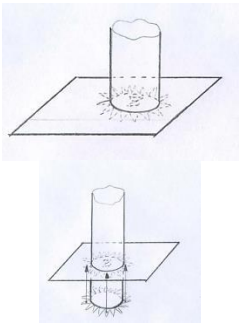


Рис.7а. «сквозное-нарое».

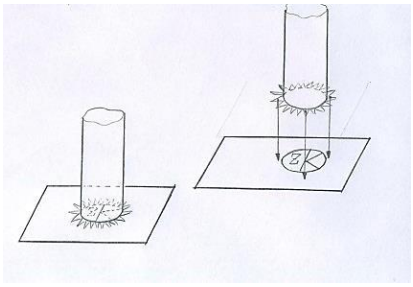


Рис.7,б. «накладочное-наружное».

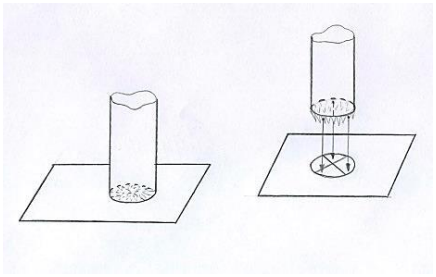


Рис.7,в. «накладочное-внутреннее».

Существуют и другие способы крепления: «накладочное-наружное» (рис.7.б), «накладочное-внутреннее» (рис.7,в).

Поле - элемент развёртки, благодаря которому стороны развертки соединяются между собой, как показано на рис.8:

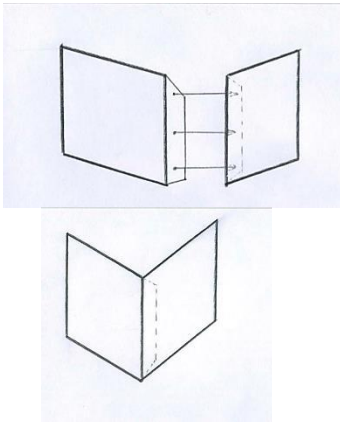


Рис.8. Крепление поверхностей между собой.

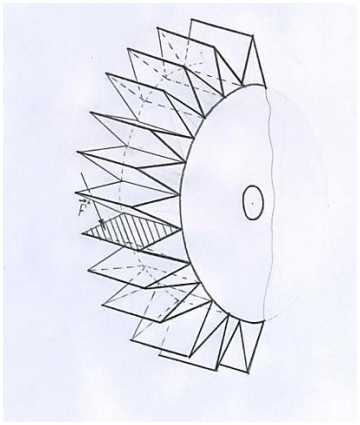


Рис.9,а. Шестерня.

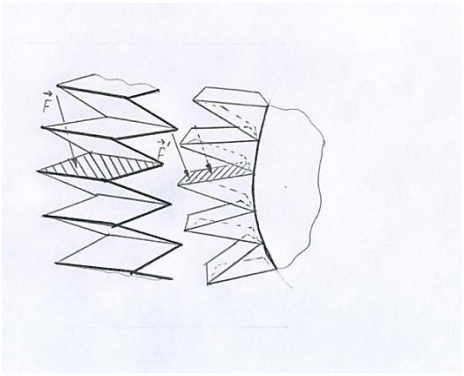


Рис.9,б. Правильное расположение «полей».

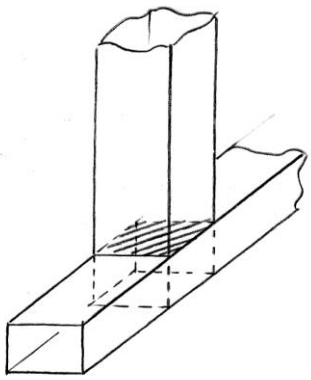
Пример на рис.9,а,б:

В примере с шестерней видно, что сила прикладывается на выделенную (заштрихованную) поверхность. Если поля жестко соединены со звездой, как на рис.9,б, то продавливания под действием силы не произойдет, так как действующая сила F распространяется на выделенной поверхности. Эта сила будет передаваться на поля в виде силы F'. В ином случае (поля жестко скреплены с ремешком) произойдет продавливание.

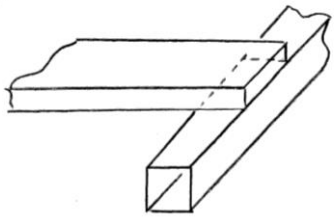
Сложные макеты.

Теперь приступим к построению сложных макетов и механизмов. Сначала по чертежу представляют форму изображаемого объекта. Оценивается геометрия. Выбирается принцип построения макета: прямой или обратный. В чем их различие? Различие в том, что в прямом принципе выполняется построение сначала каркаса, т.к. форма «предсказуемая» (макет вагона), а в обратном – если форма «непредсказуемая» то есть, форма состоящая из поверхностей общего положения (автомобиль). Элементами

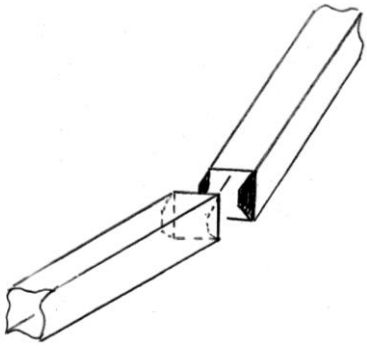
каркаса являются стойки, балки, лонжероны, которые в большинстве случаев, прямоугольного и квадратного сечений. Построение разверток элементов каркаса схоже с построением развертки призмы. Элементы каркаса необходимо соединять между собой. Ниже даны примеры соединений (стойки, лонжероны, балки):



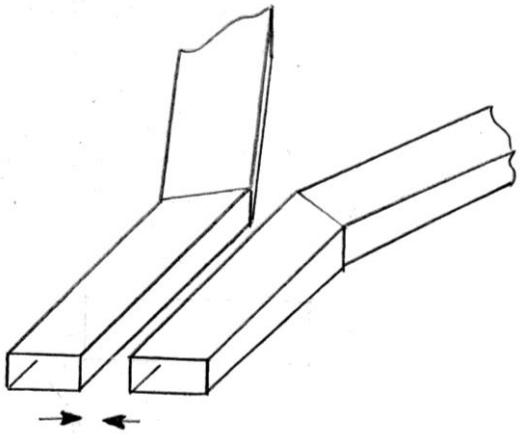
Вариант 1



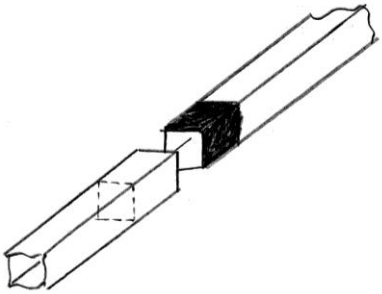
Вариант 2



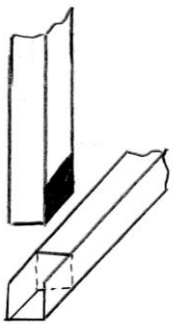
Вариант 3



Вариант 4



Вариант 5



Вариант 6

Рис.10. Варианты креплений.

Штрихованные области – вырезанная часть, закрашенная – поля. После построения каркаса устанавливается обшивка, если применен прямой принцип построения. Далее показан процесс выполнения макета промежуточного вагона метро (81-740.4 «Русич»).

О макете.

Масштаб 1:25. Выполнялся примерно 1,5 месяца. Применен прямой принцип построения, так как геометрия достаточно простая (поверхности проецирующие, поверхности общего положения отсутствуют). Макет нигде не провисает, как раз благодаря каркасу. Конструкция состоит из двух частей: корпус и крышка. Наличие каркаса дало возможность сделать детально салон вагона. Двери, которые в дальнейшем были установлены в свои проемы, так же выполнены каркасным способом (вариант 6 рис.10). Т.е. выше сказанное (салон, двери) говорят о том, что можно задавать толщину стенок.

Процесс выполнения: удобнее всего было начать с построения тележек вагона (габариты тележек). Здесь каркасный метод применяется редко т.к. сама рама тележки и есть каркас. Предусмотрена «амортизация». Эта деталь работает благодаря конструктивным свойствам бумаги, ее работы на упругость («гармошка»). Изображения даны ниже рис.11,а, б:

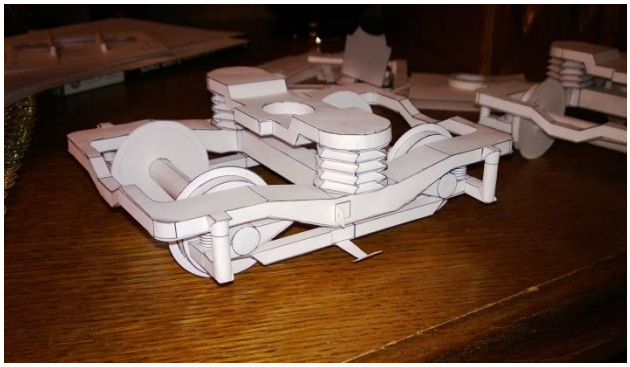


Рис.11,а. Тележка.

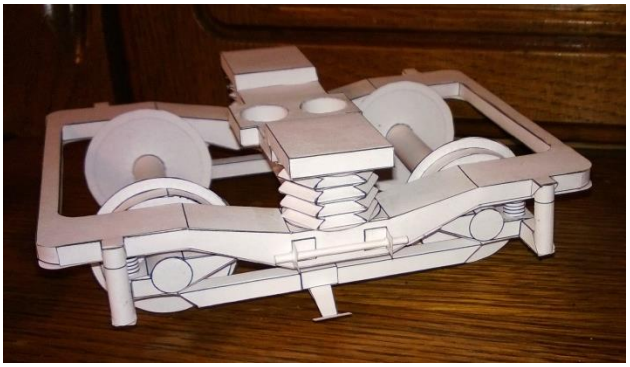


Рис.11,б. Центральная тележка.

Далее собираем каркас корпуса, который состоит из рамы и стоек. Рис.12,а,б. Габариты рамы собраны по варианту 6 и 5 (рис.10), а промежуточные поперечные балки установлены по варианту 1 (рис.10). Стойки, относительно рамы, установлены по варианту 6 (рис.10).



Рис.12,а. Каркас без обшивки.



Рис.12,б, Каркас установленный на тележках.

В первую очередь удобнее всего собрать внутреннюю часть макета – салон вагона. В роли обшивки - внутренние стенки. К ним устанавливаются сидения и прочие элемент салона (поручни). Рис. 13,а,б:

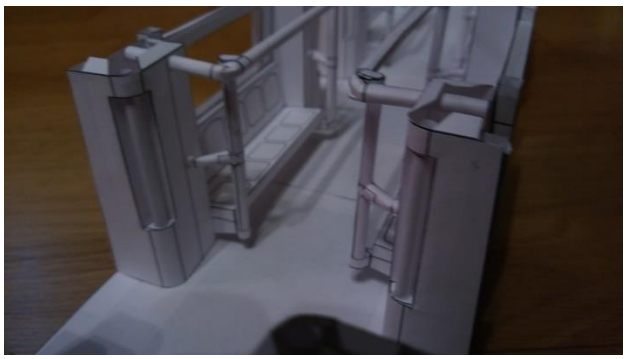


Рис.13,а. Вид салона.



Рис.13,б. «Взгляд пассажира».

Как говорилось ранее, конструкция состоит из двух частей: корпус и крышка. Каркас крышки выполнен по варианту 4 и варианту 6 (рис.14). Так же показана сборка каркасов двух частей (рис.15). Их соединение выполнено по варианту 3 (рис.10).

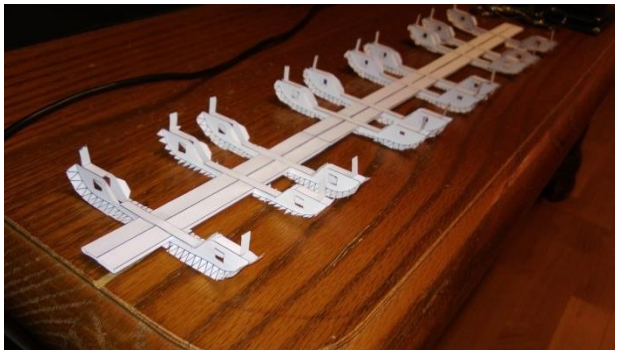


Рис.14. Каркас крышки.



Рис.15. Соединение.

В конце клеится обшивка и элементы, устанавливаемые на корпус (рис. 16,а,б,в,г).



Рис.16,а. Торец.



Рис.16,б. Стенки.

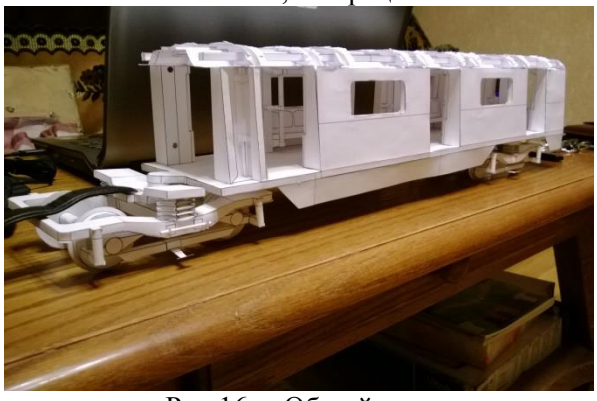


Рис.16,в. Общий вид.



Рис.16,г. Наружные элементы.

Готовый макет вагона рис.17,а,б,в,г:

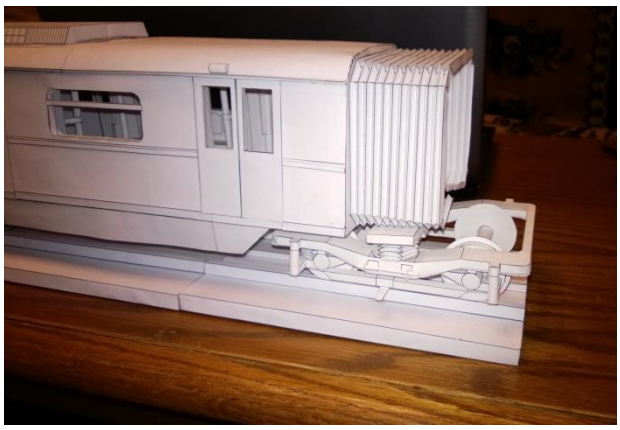


Рис.17,а. Сочленение.



Рис.17,б. Готовый вагон.



Рис.17,в. Второй вагон (с разрезом).



Рис.17,г. Сам разрез.

А теперь рассмотрим построение каркаса макета с обратным принципом построением на примере автомобиля «Ансырь» разработанного на кафедре «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

О макете.

Масштаб 1:10. На данный момент в процессе создания. Применен обратный принцип построения, так как геометрия достаточно сложная (присутствуют поверхности общего положения). Макет, так же как и в предыдущем примере, нигде не провисает благодаря каркасу. Соединения элементов каркаса выполнены по вариантам 2, 3, 6. Сначала была собрана обшивка, а затем с учетом особенностей формы был выполнен каркас. Конструкцию можно увидеть на рис. 18,а,б,в,г,д:



Рис.18,а. Перед.

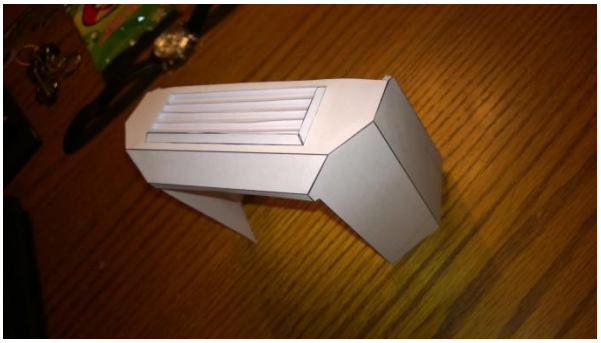


Рис.18,б. Перед с другого ракурса.



Рис.18,в. Каркас.



Рис.18,г. Каркас.



Рис.18,д. Собраны каркас и обшивка.

Механизмы.

В этом разделе описывается пример создания макета механизма. В качестве примера дан реечный механизм. В свою очередь, зацепление зубчатого колеса и рейки было спроектировано в курсовом проектировании предмета «Теория механизмов и машин». В данном примере показано наличие и соответственно выполнение шпоночного соединения. Процесс выполнения: сначала вычерчивается две звезды с жестким соединением полей, которые будут расположены в торцах, и две звезды без полей - расположены внутри (играют роль каркаса). Между звездами располагаются шайбы имеющие толщину 5; 10; 5 мм соответственно. Так же в отверстии зубчатого колеса выполнен паз для шпоночного соединения (Рис. 19,а,б).

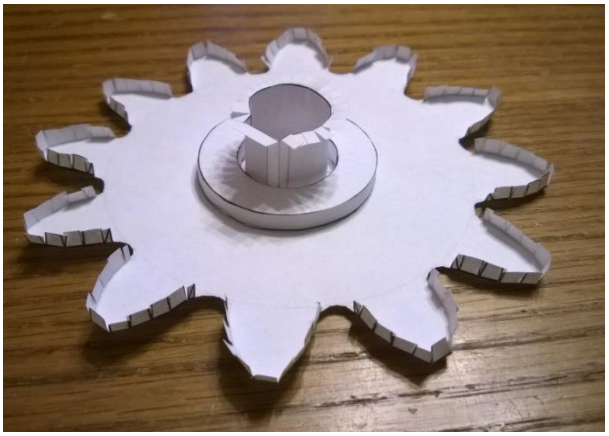


Рис.19,а. Звезда.

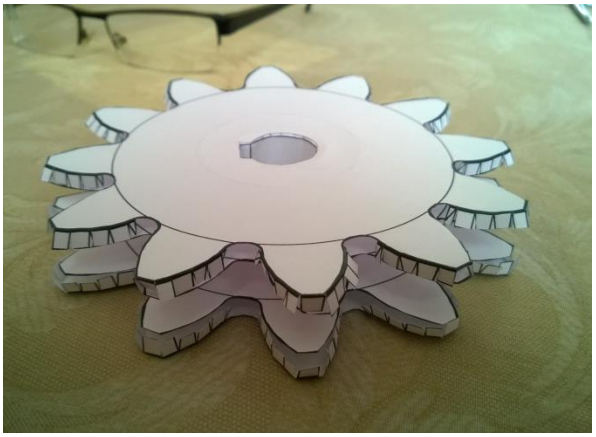


Рис.19,б. Набор звезд.

Затем собирается ремешок. Он выполнен из отдельных модулей, так как собирать такого рода элемент удобнее всего по частям. На ремешке отсутствуют поля, так как может произойти продавливание под большим усилием, несмотря на наличие звездочек расположенных внутри. Рис.20.

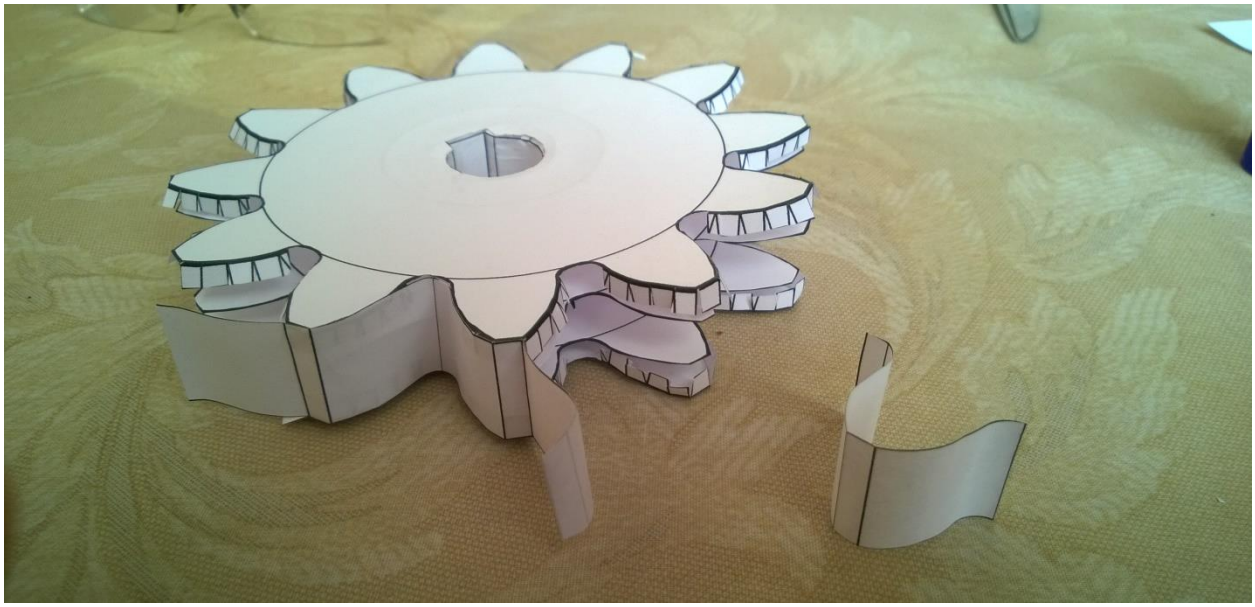


Рис.20. Сборка зубчатого колеса.

Затем собирается рейка. Конструкция аналогична той, которая была применена в сборке зубчатого колеса, с той лишь разницей, что здесь нет каркаса (рис.21).

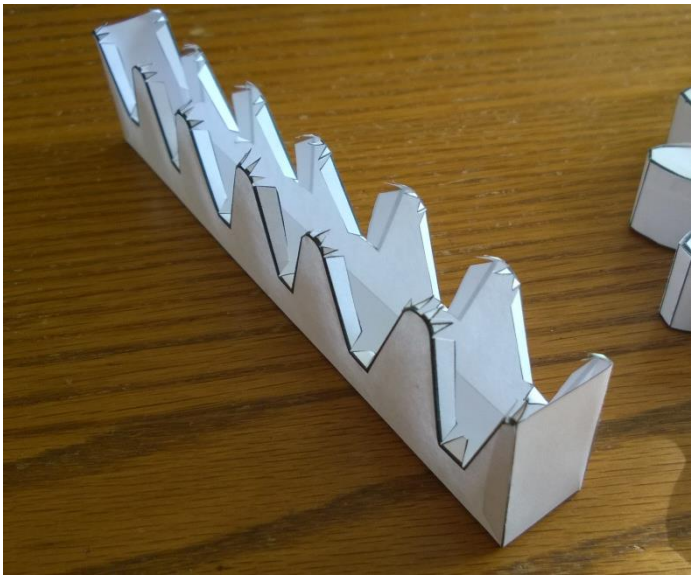


Рис.21. Рейка.

Далее выполняется вал. Построение развертки вала основана на принципе построения цилиндра. В развертке выполняется прямоугольный вырез для паза. Развертка призматической шпонки схожа с разверткой куба. Размеры шпонки были выбраны произвольно (т. к. это лишь пример). И в конце создается корпус. Все детали устанавливаются по своим местам (рис. 22,а,б,).

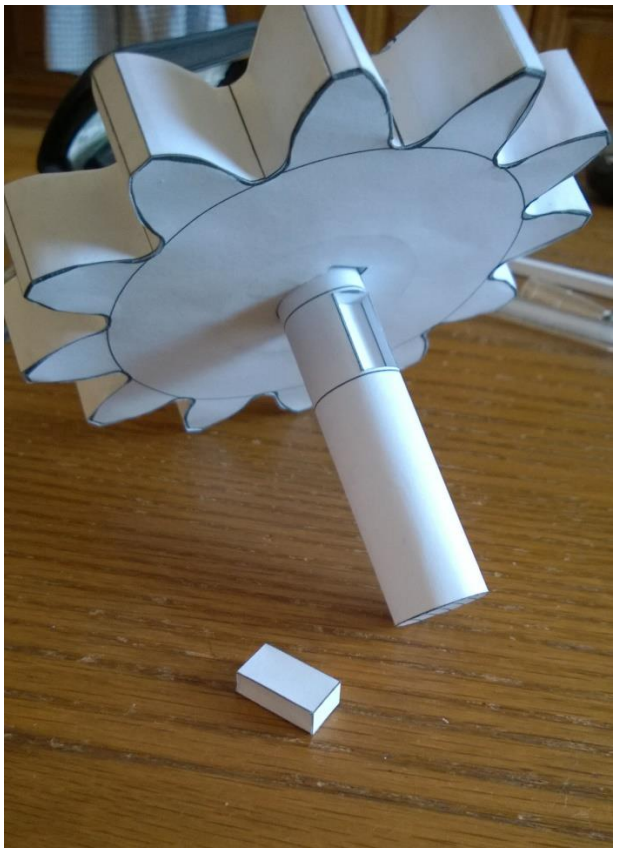


Рис.22,а. Паз и шпонка.

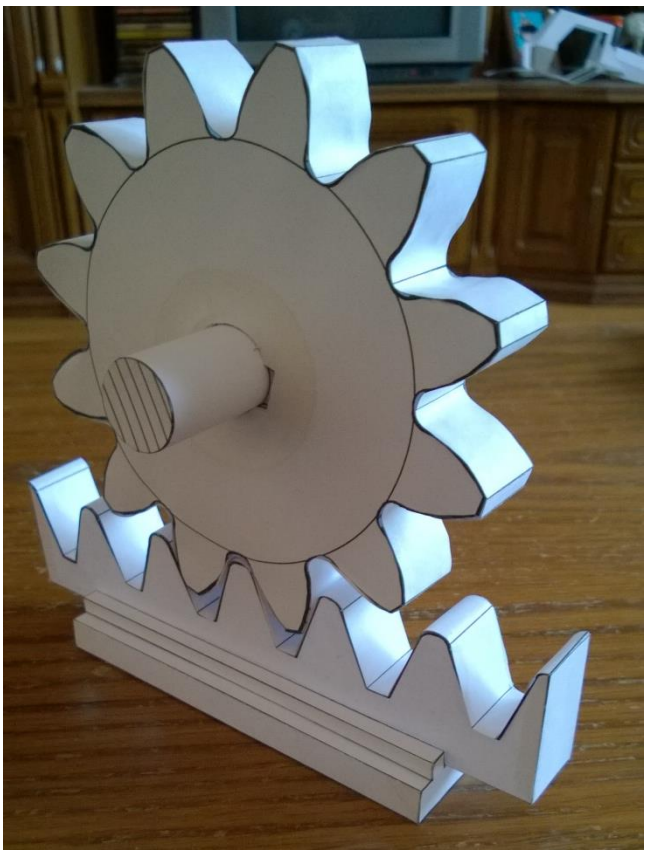


Рис.22,б. Собранный механизм.

Заключение

Полученные результаты показывают большие возможности построения макетов, в связи с этим в дальнейшем планируется выполнять макеты сборочных единиц.

Литература

1. Калмыкова Н.В., Максимова И.А. Макетирование: Учебное пособие. – М.: Издательство «Архитектура-С», 2004.-96 с., ил.
2. Коротеева Л.И., Яскин А.П. Основы художественного конструирования: Учебник. – М.: Издательство «ИНФРА-М», 2011.-304 с. – (Высшее образование).
3. Лагерь А.И., Основы начертательной геометрии: Учебник/А.И. Лагерь, А.Н. Мота, К.С. Рушелюк. – 2-е издание – М.: Высшая школа, 2007.-281 с., ил.
4. Стасюк Н.Г., Киселева Т.Ю., Орлова И.Г. Макетирование: Учебное пособие, 2010.-96 с., ил.
5. Аргумент «За!» Молодежный научно-творческий журнал, №1, декабрь, 2007.

УДК 658.512.23

СВЕТИЛЬНИК СВЕТОДИОДНЫЙ ПАРКОВЫЙ

Ирина Константиновна Платонова,
студентка 6 курса,
кафедра «Промышленный дизайн»
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: И.Н. Лысенко,
ведущий преподаватель кафедры «Промышленный дизайн»

Уличные светодиодные светильники в последнее время набирают все большую популярность, даже несмотря на более высокую стоимость. Ведь использование светодиодов позволяет создавать самые экономичные в эксплуатации и долговечные системы освещения.

Главный элемент такого светильника — это светодиод, наиболее эффективный на сегодня прибор для превращения электрической энергии в свет. Благодаря свойствам светодиодов, светильники обладают контрастностью света в сотни раз большей, чем у газоразрядных ламп (ртутных и натриевых). За счет этого достигается превосходная четкость освещаемых объектов.

Но особо активному росту популярности светодиодные светильники обязаны своей высокой экономической эффективностью при наружном светодиодном освещении улиц. Кроме того, что эти приборы потребляют энергии в разы меньше всех других видов светильников, они служат в десятки раз дольше (срок их службы от 50 до 70 – 100 тысяч часов).

Конечно, даже самый совершенный технический прибор должен иметь свои недостатки. В данном случае недостатком светодиодных светильников является их цена. Пока что она заметно превышает цену всех других видов ламп. Но и здесь следует учитывать некоторые факты.

Первый факт — за время работы светильника со светодиодом (допустим, 70 тысяч часов) необходимо будет заменить лампу накаливания в аналогичном светильнике около 70 раз, ртутную (или натриевую) лампу – около 7-10 раз. Кроме того, светодиоды не нужно утилизировать, как ртутные лампы, т.к. они не опасны для окружающей среды. Следует помнить, что замена лампы и ее утилизация относится к дополнительным расходам.

Второй факт — за время работы светодиодные светильники потребляют в разы меньше электроэнергии. За почти 10 лет работы они могут сэкономить массу денег.

Помимо высокой эффективности, светодиодные светильники имеют ряд других преимуществ. Они не мерцают в отличие от люминесцентных ламп и могут сравнительно легко использоваться в сетях с частыми перепадами напряжения без каких-то повреждений.

В структуру коммунального хозяйства мегаполисов, городов и поселков входят сети уличного освещения – энергоемкие объекты, от правильного построения которых зависит эффективность работы, рациональность использования энергоресурсов и минимизация их потерь. Все вышеперечисленные задачи, а также проблемы обслуживания помогает решить внедрение новейших технологий энергосбережения. С годами большая часть оборудования городских и районных сетей устаревает, в настоящее время остро встает вопрос об его замене на экономически более выгодное современное энергосберегающее уличное освещение. Замена устаревшего уличного освещения на светодиодное позволяет существенно сократить расходы на электричество, а также снизить эксплуатационные затраты.

Сейчас производство светодиодных светильников сильно увеличилось в силу их эксплуатационных свойств, но они очень сильно похожи друг на друга. А в их формообразовании не используются все возможности светодиодов. На рисунке 1 некоторые их представители.



Рис. 1. Модельный ряд производимых светодиодных уличных светильников

Для дизайнеров светодиоды стали настоящим кладезем оригинальных идей. Это дает возможность оформить любой парк или сад в индивидуальном стиле, наилучшим образом соответствующем его особенностям. Хороший дизайн освещения имеет не только функциональное, но и эстетическое значение. На рисунке 2 представлены примеры дизайнерского освещения улиц с помощью светодиодов.



Рис. 2. Интересное использование светодиодов в уличном освещении

В этом проекте представлен светильник светодиодный в двух размерах с единым оформлением. Он может не только освещать дорогу в темное время суток парков, скверов и улиц, но также сможет радовать прохожих интересной и необычной формой и соответствующей игрой света.

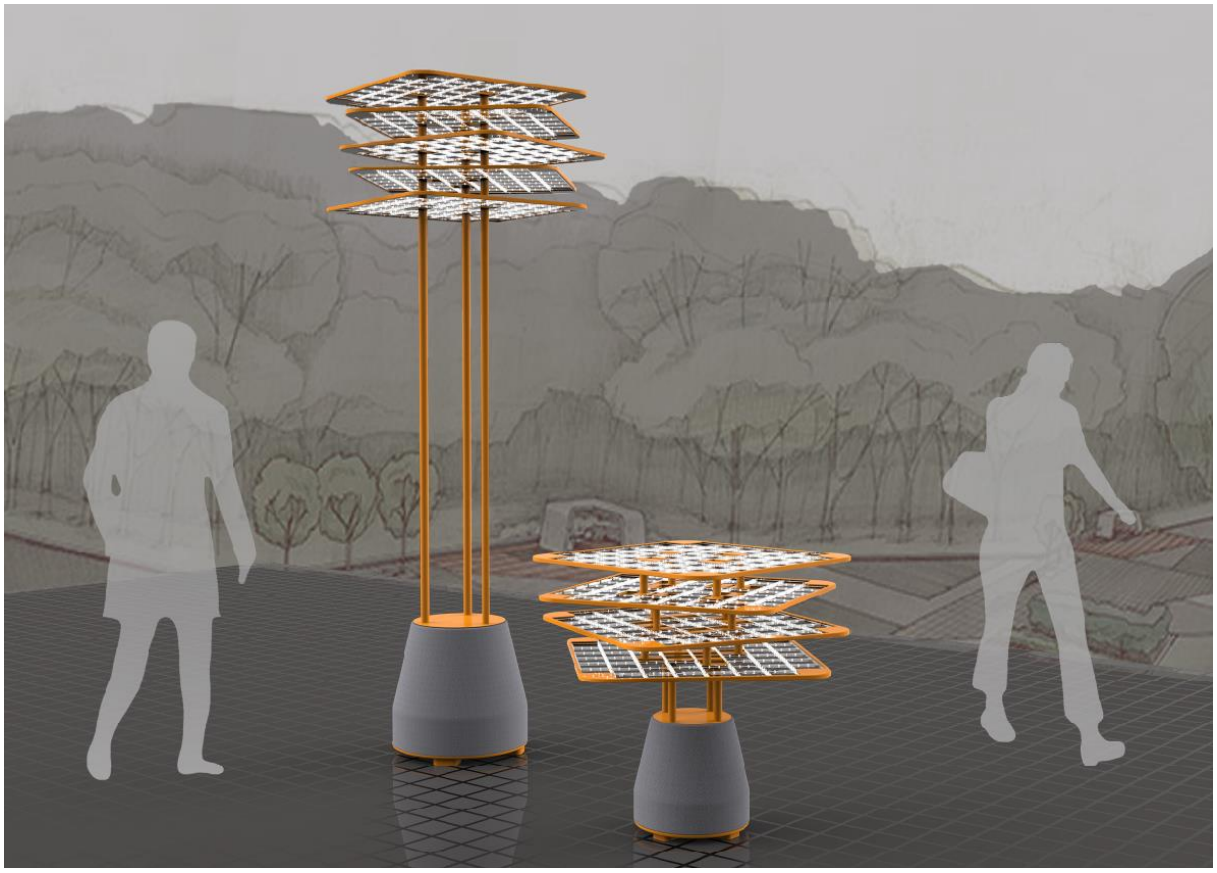


Рис. 3. Проект светодиодного светильника

Дизайн светильников может ассоциироваться с азиатскими пагодами и искусством Бансай, что благоприятно может воздействовать на чувства людей.

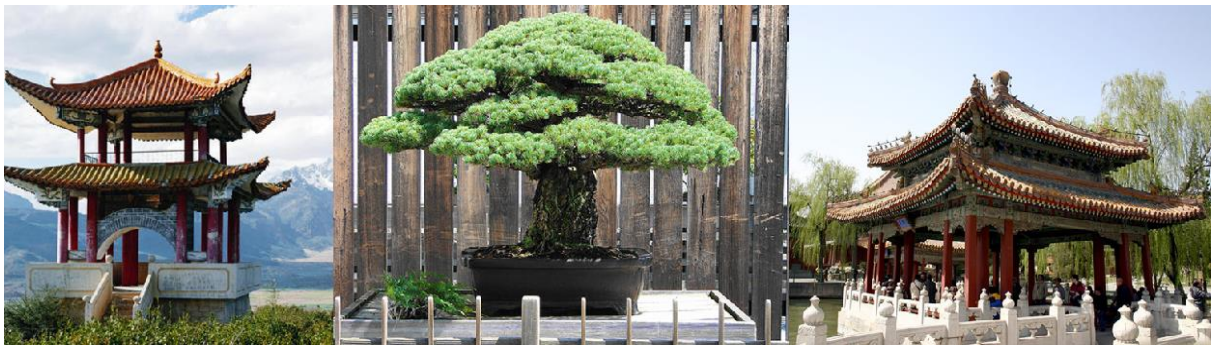


Рис. 4. Азиатские пагоды и искусство Бансай

Светильник гармонично вписывается в парки и скверы. А за счет двух размеров они могут устанавливаться и вдоль дорожек, и у скамеек, и у клумб, освещая необходимые места и подчеркивая красоту парковой архитектуры. Также светильник может быть представлен в разных цветовых решениях. В этом случае меняется только цвет ПВХ профиля и цвет окраски металлических деталей.



Рис. 5. Светильники в парке

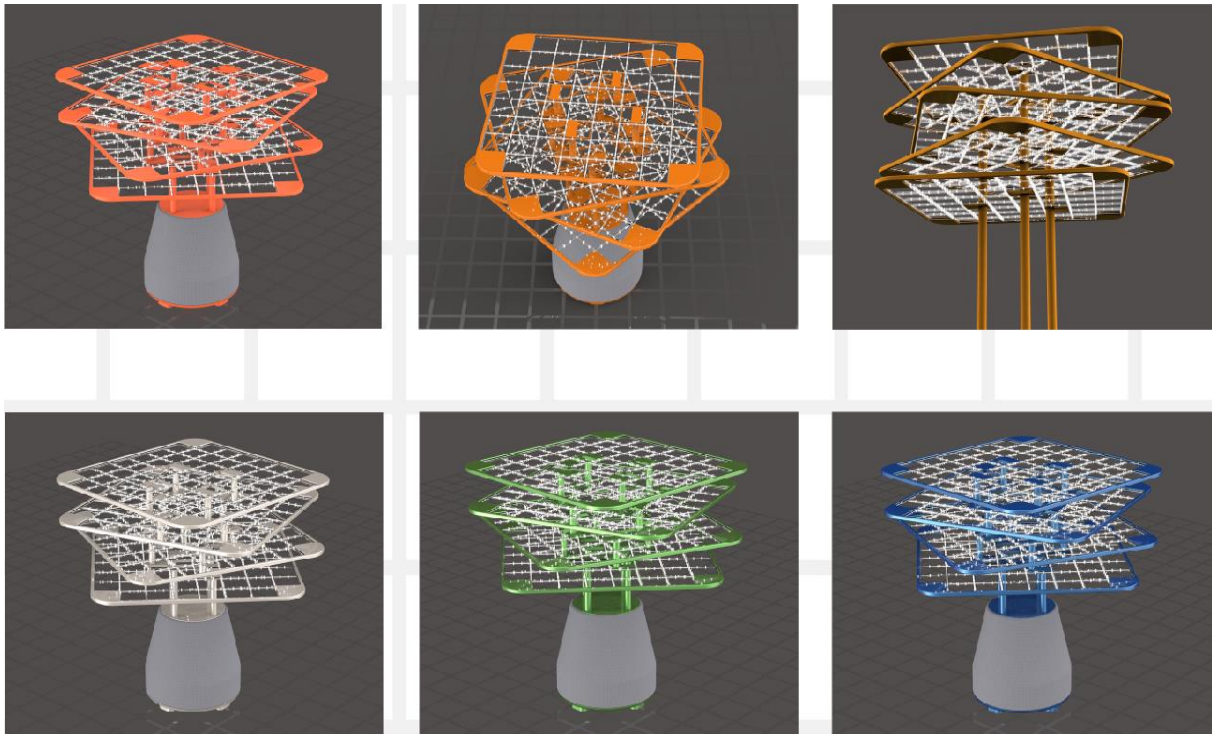


Рис. 6. Цветовой ряд светильника

Светильник представляет собой (рис.7) металлический каркас (3), к которому с двух сторон крепится пластиковая окантовка-диффузор (1) со светодиодной лентой (2). По краю проходит профиль ПВХ (4), который может быть разных цветов. С помощью механический подвижных элементов (5) и труб (6) проводятся провода, это также может обеспечивать различные углы поворота и смещение каждого слоя относительно друг друга. Вся конструкция устанавливается на бетонное полое основание (9) с блоком питания (8) и проводами внутри. Съемная верхняя крышка позволит менять блок питания

при необходимости (7), а нижняя перфорированная крышка (10) и опоры (11) обеспечивают вентиляцию воздуха для охлаждения блока питания.

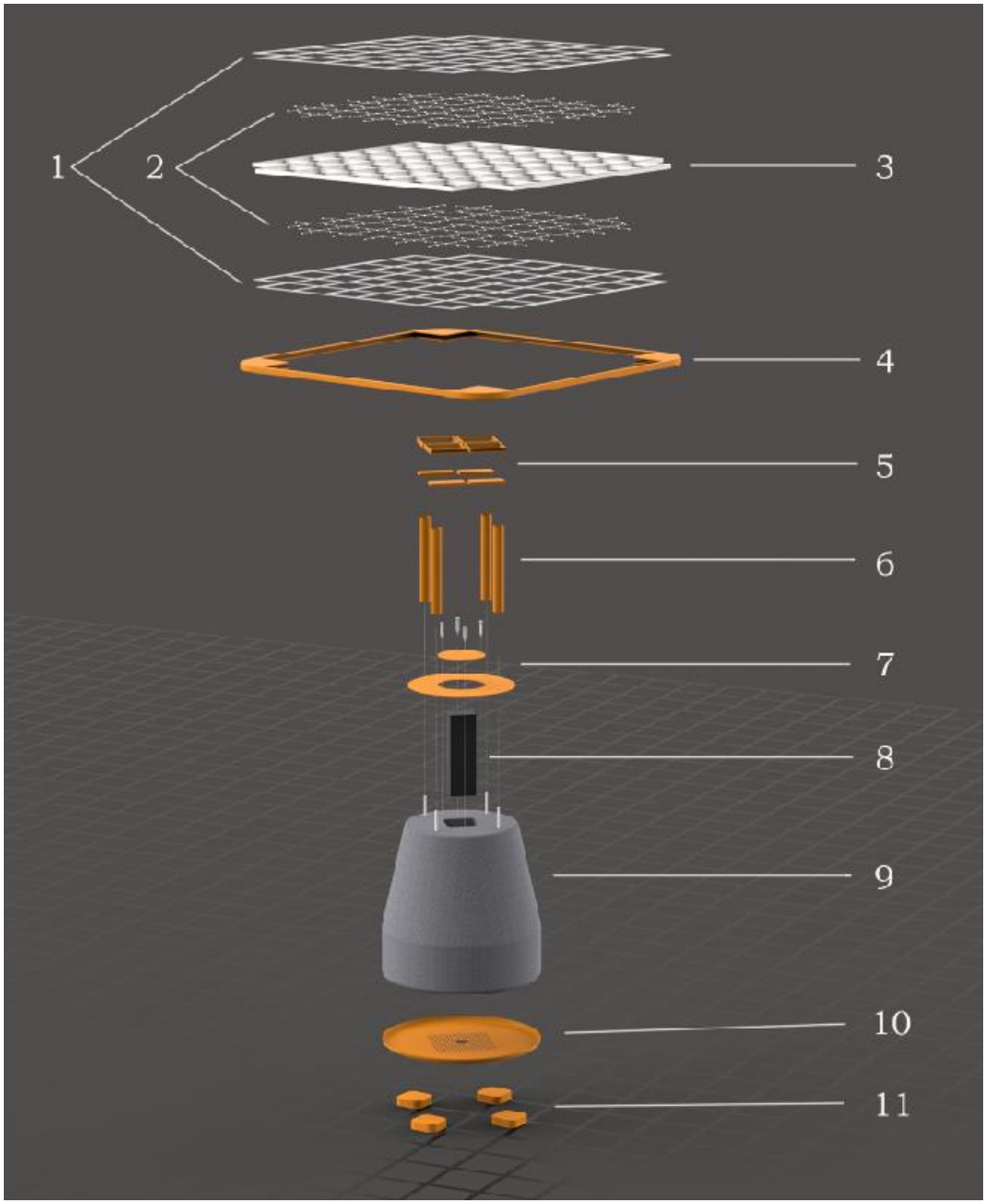


Рис. 7. Взрыв-схема

Светильники подвергаются воздействию осадков (снега, дождя), а воздух насыщен пылью, копотью, выхлопными газами, частичками антиобледенителей, масел, не сгоревшего топлива и проч. В данном проекте светильники полностью герметичны. Светильники часто находятся в труднодоступных местах, обслуживание их затруднено. Несмотря на то, что светодиоды имеют длительный срок службы, в проекте предусмотрена простая процедура их замены.

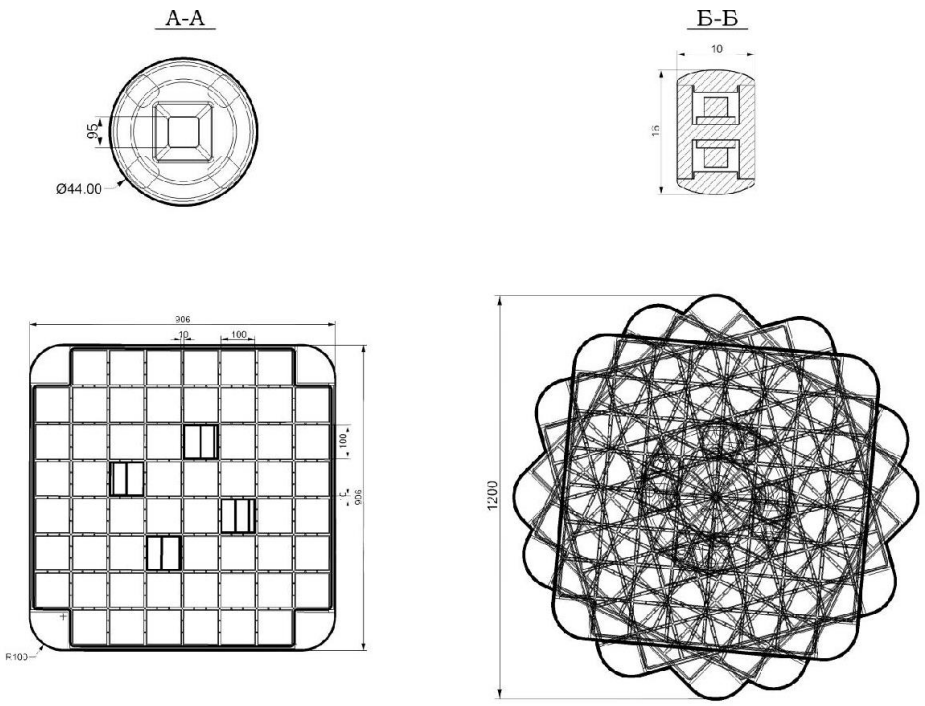


Рис. 8. Основные размеры. Вид сверху.

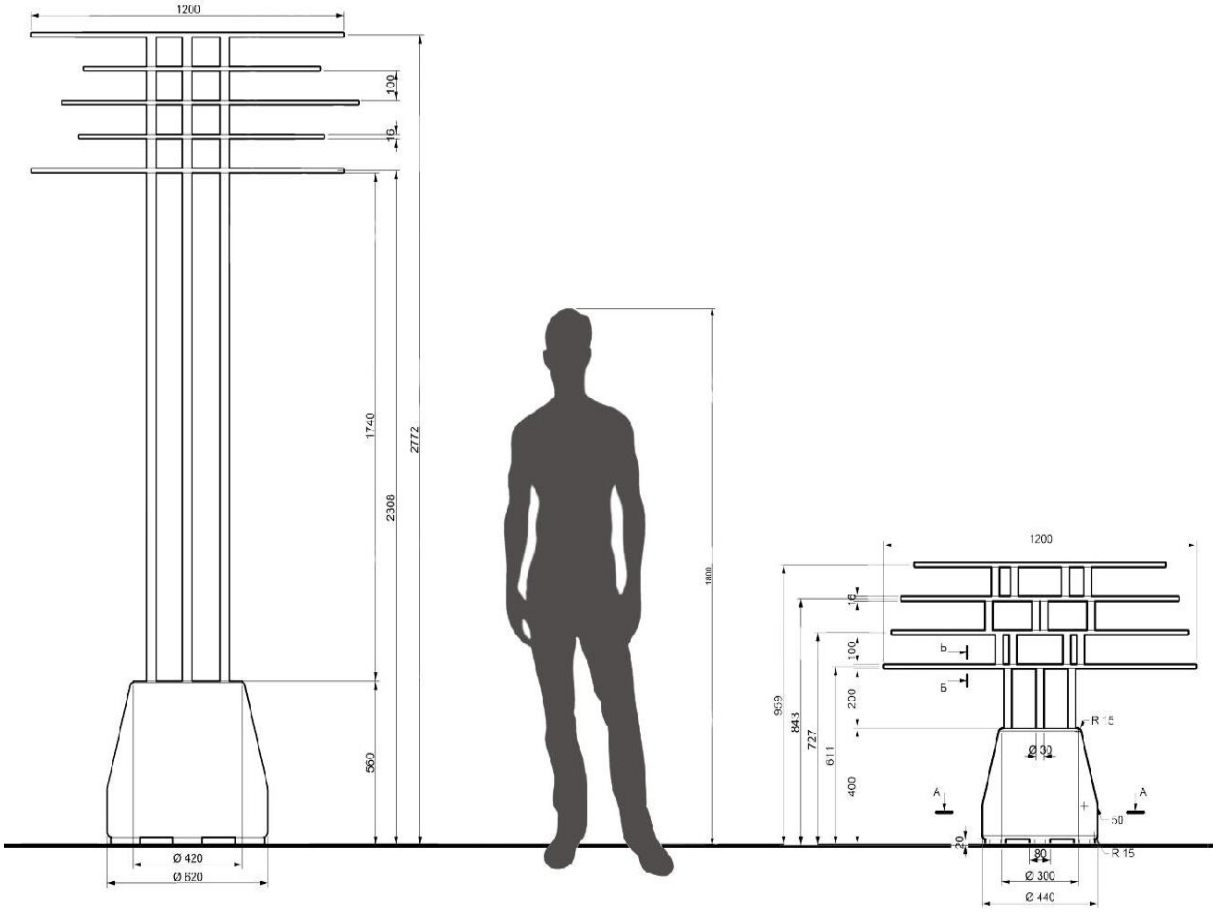


Рис. 9. Основные размеры. Вид спереди.

Разработанный проект светодиодного светильника - это сочетание оригинального дизайна с высококачественным освещением, позволяющим оживить улицы парков и скверов.

Литература

1. http://www.atomsvet.ru/production/street/
2. http://www.orion-opora.ru/s-i/ulichnye-svetodiodnye-svetilniki
3. http://www.myhome.ru/journal/knowledge/176
4. http://www.led-pro.ru/street-lighting
5. http://www.mecelectrica.ru/catalogue/?catalogue_id=274

УДК 658.512.23

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОФИЛАКТИКИ ТУННЕЛЬНОГО КАРПАЛЬНОГО СИНДРОМА

Ирина Константиновна Платонова,
студентка 6 курса,
кафедра «Промышленный дизайн»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: М.М. Михеева,
ведущий преподаватель кафедры «Промышленный дизайн»

Сейчас производится много устройств, помогающих людям в их работе, обучении, для медицины, просто для игр и развлечений. С одной стороны, производители вроде бы стараются удовлетворить потребности людей в разных областях, а с другой — найти свободные ниши для получения прибыли. На первый взгляд — всех должно все устраивать. Но если присмотреться к любой из деятельностей человека в настоящее время, то сразу возникает множество вопросов и несоответствий.

Производители уделяют большее внимание новинкам в области технических характеристик, функциональности и внешнему виду, которые заставят людей покупать их продукт. И только иногда рассматривается эргономика, как человек будет взаимодействовать с этим предметом. Часто закрываются глаза на явные недостатки и возможные негативные последствия.

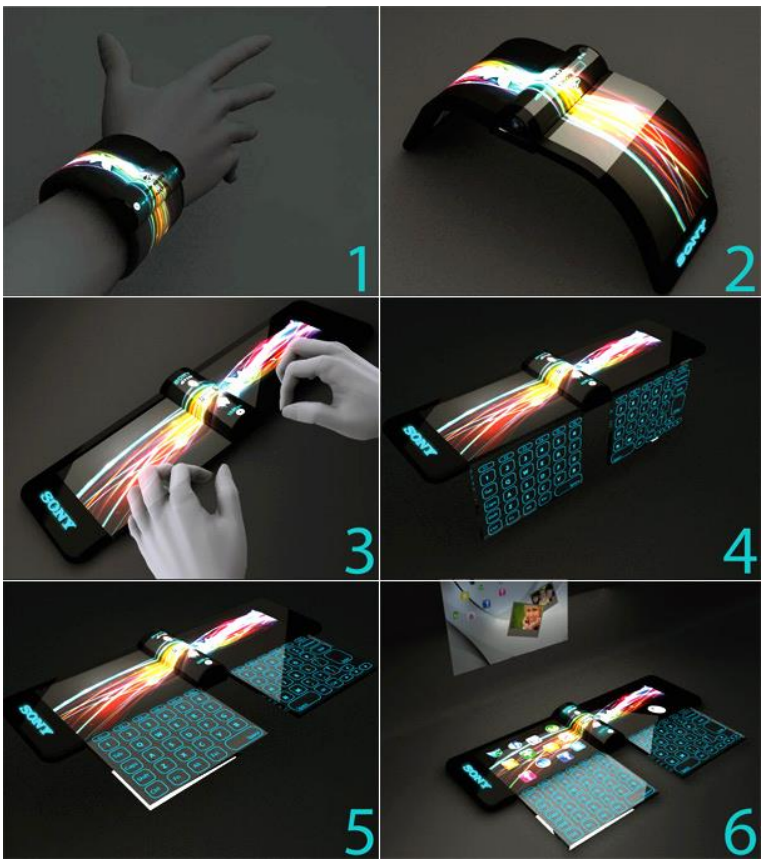


Рис. 1. Один из множества проектов на ближайшее будущее

Один из самых распространенных видов деятельностей — работа за компьютером с соответствующим набором устройств и оборудования.

В наше время много людей заняты этим родом занятий и, порой, по несколько часов ежедневно, что приводит к серьезным заболеваниям. Часто человек даже не знает, что заболевание связано напрямую с его деятельностью, с тем или иным оборудованием. Совокупность этих заболеваний получила название «компьютерный синдром» или «синдром «белых воротничков», то есть офисных работников. Некоторые из них появились еще в 70-х годах прошлого столетия, другие стали очевидными в последние годы.

Большинство медиков говорят сейчас о пяти основных симптомах компьютерного синдрома: зрительном, карпальном туннельном, позвоночном, дыхательном и сосудистом. Нужно заметить, что в нашей стране компьютерный синдром не входит в список профессиональных заболеваний и в целом его не лечат.

Туннельный карпальный синдром часто является результатом монотонной деятельности и нарушением эргономических требований.

В частности, среди причин появления заболевания — неправильная поза во время работы и неправильный изгиб руки при использовании современных средств коммуникации (работа с «мышкой» и клавиатурой, планшетами, ноутбуками и др.).

Раньше такая патология считалась возрастной, поскольку ей были в основном подвержены люди после сорока лет, чаще женщины. В XX веке эту болезнь называли «рука машинистки» – от постоянной вибрации при печати на машинке больше всего страдали суставы рук, приводя в тяжелых случаях к инвалидности и необходимости сменить профессию. В XXI веке заболевание переместилось в офисы – риск заполучить туннельный синдром особенно высок у всех, кто проводит за компьютером более 3-4 часов в день, интенсивно печатая или двигая мышку. Помимо «белых воротничков», туннельному синдрому подвержены водители, парикмахеры, кассиры, некоторые музыканты (скрипачи, пианисты) и фотографы. Средний возраст начала заболевания – 40-

60 лет, однако болезнь, увы, молодеет, и при должном невнимании к своему здоровью, можно начать жаловаться на боли в руках и в 25 лет. Причем между длительностью их работы с ПК и возникновением заболевания существует прямая связь.

Проявляется синдром болевыми ощущениями в локтевых суставах, предплечьях, запястьях, кистях и пальцах рук. За такими симптомами, по словам специалистов, скрывается целый букет болезненных состояний конечностей, говорящий о повреждении суставного и связочного аппарата. В конце концов, медики объединили все эти случаи под общим названием RSI (от английского repetitive strain injury), то есть «травма от постоянного напряжения».

После отдыха симптомы обычно не проходят, случается, неприятные ощущения не дают уснуть и будят ночью. Если не заняться лечением, или хотя бы не взять длительный отпуск, проблемы усиливаются: появляются боли, сперва легкие, затем мучительные, сковывающие. Вплоть до того, что пациент не может удержать ложку или карандаш, держаться за поручень, больше 10-15 минут выполнять ручную работу.

Длительное напряжение мышц кисти приводит к ухудшению их кровоснабжения, при нарушениях которого начинаются деструктивные процессы в сухожилиях и мышцах (рис.2). Сами по себе они вреда пока не несут, организм знает, что надо делать — увеличивается ток крови через поврежденное место, что обеспечивает нормальное питание и своевременный вывод продуктов распада. При прекращении вредного воздействия неприятные ощущения пройдут сами собой. Но если мы и дальше работаем кистью таким же образом (там не очень много болевых окончаний, и заметить начало болезни проблематично), продолжая напрягать мышцы, а заодно и уменьшая просвет туннеля изгибом кисти, то мы получаем отек мышц и сухожилий — жидкость не выводится должным образом. Развивающийся отек давит на срединный и локтевой нервы и прилегающие сосуды, вызывая гипоксию (недостаточность кислорода) и отек тканей и нервов. Нерв в таком состоянии не может полноценно выполнять свои функции, из-за этого возникают такие неприятные эффекты (парестезии) как: уменьшение чувствительности, болезненность, покалывания в пальцах, слабость ладони. Мышцы кисти и пальцев, которыми управляет нерв, постепенно «расслабляются» — к ним не доходят полностью сигналы от мозга, и они начинают атрофироваться.

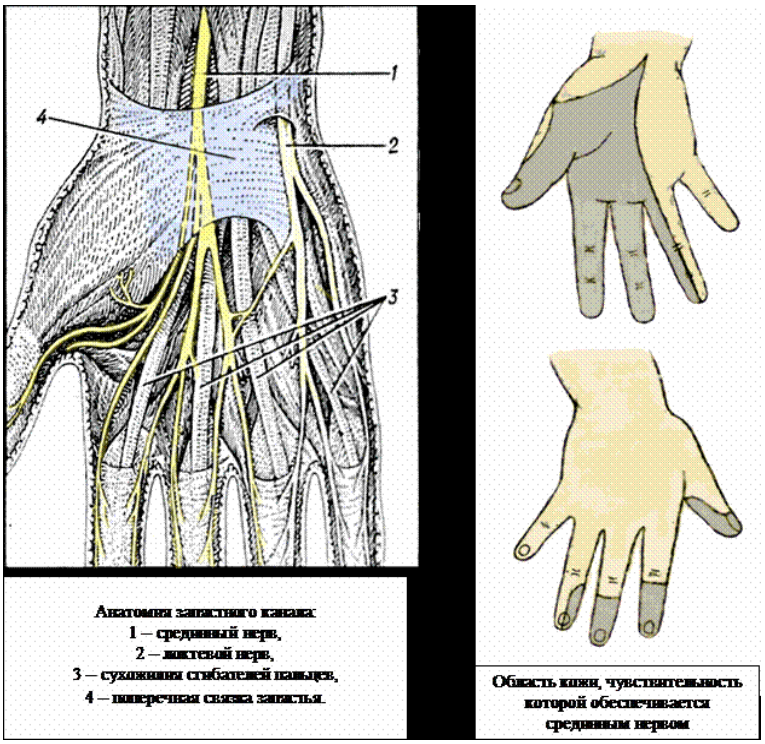


Рис. 2. Анатомия запястного канала

Что касается руки и запястья — более естественное, так называемое среднефизиологическое положение. Мы обычно не ходим с прямыми пальцами, кисть всегда немного согнута. В таком положении сгибательные и разгибательные мышцы находятся в наиболее физиологически комфортном положении. Если встать, расслабить руки, опустить их вниз, то ладони обращены внутрь, «к себе». Теперь, если положить руку на стол, не меняя ее положение нигде, кроме локтя, то она лежит локтем и ребром кисти на столе. А теперь, если положить кисть на мышку, она поворачивается относительно локтя почти на 90 градусов (рис.3).

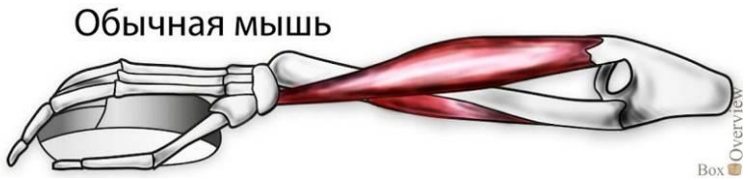


Рис. 3. Поворот кисти руки для захвата мыши

Это положение не физиологично — мышцы руки (обеспечивающие вращение внутрь (пронаторы)) и кисти постоянно напряжены. А супинаторы (мышцы, вращающие «наружу»), наоборот, растянуты. Постоянное напряжение мышц приводит к отеку, и далее процесс идёт по нарастающей. Например, квадратный пронатор — мышца, вращающая предплечье внутрь (рис.4), больше всего напряжена при неправильном положении кисти. И расположена она у самого запястного канала, соответственно, ее отек в первую очередь будет давить на нервы и сосуды, что и послужит причиной неприятных ощущений.

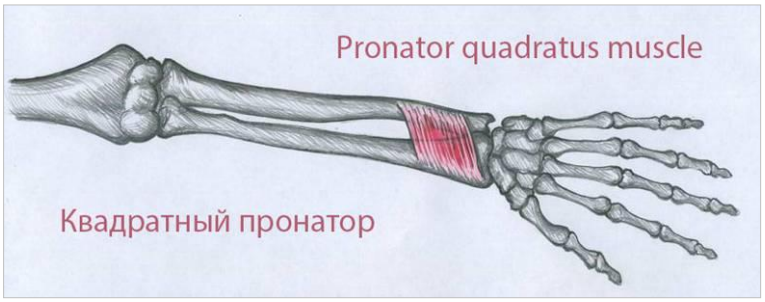


Рис. 4. Квадратный пронатор

Также если мышка остается на одном и том же месте в течение всего дня, то это может привести к перенапряжению. Растяжение верхних конечностей происходит, когда сухожилия напрягаются больше, чем следует в течение длительных периодов времени. Причиной этому может стать повторяющиеся движения или постоянное неудобное положение кисти руки.

Это заболевание сравнительно молодо, но специалистам во всем мире о нем уже многое известно, оно описано во многих источниках профессиональной медицинской и популярной литературе для обычных людей. Уже им болеет громадное количество людей, только в Америке каждый год по статистике прибавляется по 1 миллиону заболевших. По другой статистике страдает каждый шестой человек в мире.

И, несмотря на это, до сих пор производится и продается оборудование, способствующее развитию этого заболевания.



Рис. 5. Стандартные «мышки» и клавиатуры

Все же есть некоторые попытки производить хороший качественный продукт, что в данном случае может означать удобное и функциональное пользование, отвечающее запросам людей современным внешним видом, но не приводящее к плачевным последствиям для организма.



Рис. 6. Попытки производить эргономичное оборудование

В этом оборудовании, конечно, решаются некоторые проблемы, но далеко не все. Не решена главная — изгиб в запястье.

Работу за компьютером и эргономику рабочего места необходимо рассматривать в целом и с разных сторон. Есть некоторые рекомендации от специалистов.

Высота полки для клавиатуры и мыши должна быть на уровне живота и по возможности обеспечивать работу с прямыми запястьями (как по вертикали, так и по горизонтали). Её длина должна быть не меньше 80 см, лучше значительно больше, чтобы клавиатура и коврик мышки свободно помещались на ней, чтобы клавиатуру можно было сдвигать левее и правее, а мышь удобнее держать напротив подлокотника кресла.

Среди столов наиболее эргономичной признана криволинейная угловая форма. За счет вогнутости большая часть площади оказывается используемой, поскольку попадает в зону охвата руками человека, равную 35-40 см. Но если край стола закруглен слишком плавно или его поверхность Г-образной формы, то придется тянуться за бумагами. Площадь столешницы хорошего стола не может быть меньше 1 кв. м.

Правильное положение рук. Сюда относят: прямое положение кисти по отношению к предплечью, избегать разгибательного положения кисти, угол сгиба руки в локтевом суставе более 90^{o}, наличие упора для кисти и локтя. Кисти и запястья во время работы должны оставаться в расслабленном состоянии. Для перемещения мыши необходимо использовать всю руку во избежание перенапряжения запястья. Не опираться руками на поверхность или край стола, а также на лежащие на нем предметы. Исключение может составлять только специальная силиконовая подушечка, используемая в качестве опоры для руки, работающей с мышью.

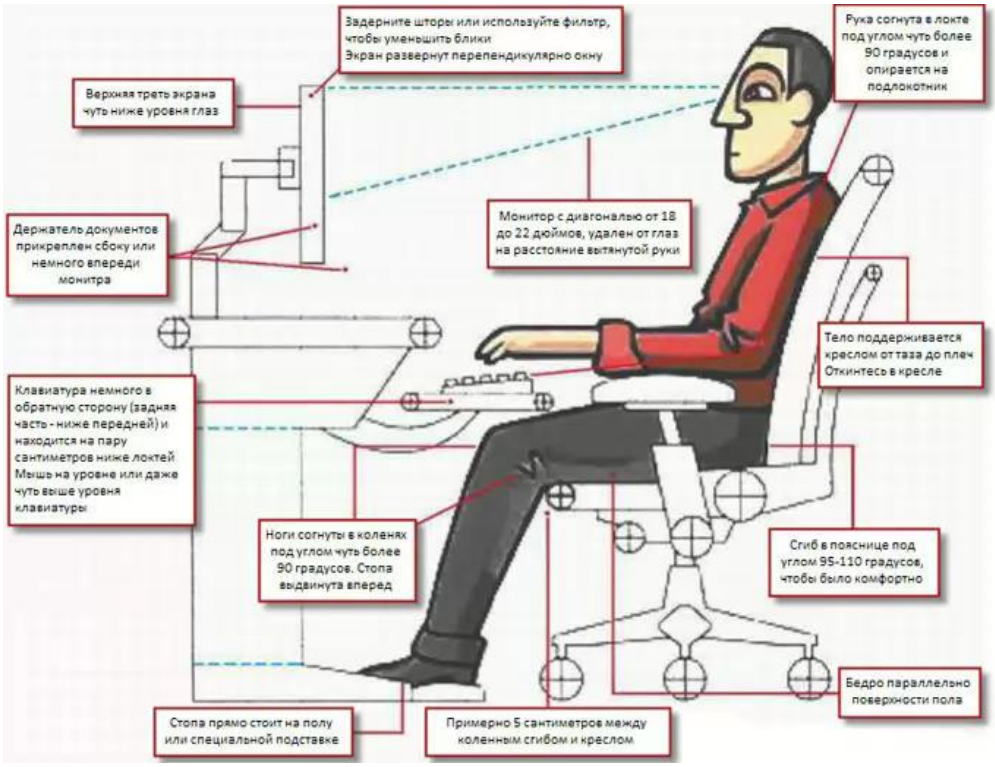


Рис. 7. Эргономика тела: как правильно сидеть за рабочим столом

Эргономические рекомендации предусматривают все опасные положения. В реальности же происходит совершено другое. Часто высота стола не соответствует росту человека. Когда стол высокий, мы можем высоко поднять стул и поставить подставку под ноги. Но если стол слишком низкий, то человеку приходится сильно наклоняться вперед, провоцируя заболевания позвоночника, а запястья еще сильнее напрягаются. Ширина и глубина столешницы не позволяют нормально положить руки полностью. Выдвижная подставка для клавиатуры вообще не дает нормально расположить на ней руки.



Рис. 8. Как сидят за компьютерами

В последнее время пользователям предлагаются подставки под локоть и запястье, но они решают какую-то частную проблему, не основную, а также обычно они не очень удобны и используются неохотно.



Рис. 9. Поставки под локоть и запястье

Для любителей компьютерных игр производят специальные кресла. Иногда рукам уделяется должное внимание, и встречаются грамотные решения, способствующие снятию напряжения.



Рис. 10. Кресло для любителей компьютерных игр

Но и тут есть одна большая проблема — человек в этом кресле может просидеть часами, совершенно не двигаясь, что чревато другими серьезными заболеваниями.

Если в целом посмотреть на ситуацию, то увидим, что столы и компьютерное оборудование практически не отвечают эргономическим требованиям для нормальной работы человека за компьютером и приводят к разным заболеваниям, в частности, к

рассмотренному туннельному карпальному синдрому. А согласно статистике портала Superjob.ru, 42% руководителей не озабочены условиями работы подчинённых. Часто они говорят о получении прибыли и рассматривают человека только как средство ее получения, не заботясь о его здоровье. И это как раз странно, ведь давно доказано, что если человек не доволен своими условиями работы, своим рабочим местом, тем более, если оно приносит сильные боли, то это как раз и является одним из мощнейших факторов потери этой самой прибыли во много раз. Неэффективные средства работы и являются источником провалов в бизнесе.

Из исследования следует сделать следующий вывод. Современному человеку, работающему за компьютером, не хватает правильно спроектированных приспособлений, которые предупреждали бы развитие заболеваний и обеспечивали эффективную работу, а также помогали людям, которые уже получили заболевание туннельного карпального синдрома. Современный рынок не предлагает полноценный ответ на поставленный вопрос. Задача последующей за исследованием дизайнерской разработки – найти приемлемое решение этой проблемы.

Литература

1. http://34.rospotrebnadzor.ru/directions/nadzor/95143/
2. http://www.compress.ru/article.aspx?id=16484&iid=755
3. http://ru.wikipedia.org/wiki/Синдром_запястного_канала
4. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14719559?dopt=AbstractPlus
5. http://www.medtran.ru/rus/articles/2007/1/tunnel-syndrom.htm
6. http://blog.unitex.ru/2011/01/ergonomika-tela-kak-pravilno-sidet-za-rabochim-stolom-na-7 ofisnom-kresle/
7. http://gazeta.zn.ua/HEALTH/kompyuternyy_sindrom.html
8. http://www.km.ru/zdorove/2012/09/04/zdorove/tunnelnyi-sindrom-zabolevanie-ofisnogo-sotrudnika
9. http://handclinic.blogspot.ru/2012/07/blog-post_13.html
10. http://skuonline.ru/blog/buysku/241.htm
11. 11.http://www.liveinternet.ru/tags/%F2%F3%ED%ED%E5%EB%FC%ED%FB%E9+%F1%E8%ED%E4%F0%EE%EC/

УДК 658.512.23

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЕТОДИОДНОГО СВЕТИЛЬНИКА ДЛЯ ЗОН ОТДЫХА

Элина Николаевна Голубева,
студентка 6 курса,
кафедра «Промышленный дизайн»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: И.Н. Лысенко,
ведущий преподаватель кафедры «Промышленный дизайн»

Введение

Светодиоды в качестве источников света используются сейчас почти повсеместно: как дома - в предметах мебели и интерьера, в качестве украшения, так и на улице – в качестве паркового и уличного освещения.

Кроме того, светодиоды имеют ряд преимуществ, таких как:

1. Высокая надёжность и долгий срок службы;
2. Высокая световая отдача;

3. Малый размер;
4. Высокая устойчивость к механическим нагрузкам;
5. Экологическая безопасность(отсутствие ртути и других вредных веществ);

Это позволяет применять светодиоды в тех областях, в которых не применимы обычные лампы накаливания. Геометрия светодиодов и их малый размер позволяет использовать их группами – например, в светодиодной гибкой ленте или одиночно – на малых поверхностях.

К недостаткам светодиодов можно отнести:

1. Высокая цена;
2. Высокая стоимость вырабатываемого светового потока;
3. Необходимость использования понижающих трансформаторов и выпрямителей из-за низкого рабочего напряжения;
4. Малая единичная мощность.

Учитывая все положительные и отрицательные стороны, был разработан проект уличного светильника со светодиодными гибкими панелями.

Анализ существующих решений

Рассмотрение и анализ существующих светодиодных уличных светильников позволил выявить закономерности и сходства существующих решений, их недостатки, достоинства и возможные направления решения.

На рисунке 1 приведены существующие решения уличных светодиодных осветительных приборов.



Рисунок 1. Существующие решения уличных светодиодных осветительных приборов.

Из рисунка 1 видно, что все существующие решения тяготеют к традиционному «ламповому» виду, не используют в полной мере особенностей светодиодов, их внешний вид не подчеркивает особенность используемого осветительного элемента.

Подчеркивание особенности светодиодов, подбор подходящей формы для обрамления характерен для интерьерных светильников фирмы Philips, представленных на рисунке 2.



Рисунок 2. Интерьерные светодиодные светильники Philips.

Одной из особенностей всех уличных светильников является их размер и освещаемое ими пространство – оно гораздо больше, чем у интерьерных светильников. Кроме того, уличные светильники подвергаются воздействию различных природных факторов.

Эскизный поиск

На начальном этапе поиска решения была получена обтекаемая форма светильника (рис. 3).



Рисунок 3. Первый вариант проектируемого светильника.

Недостатком этой формы можно считать сложность производства такого светильника, поэтому от нее пришлось отказаться и перейти к модульной – сборной конструкции (рис. 4).

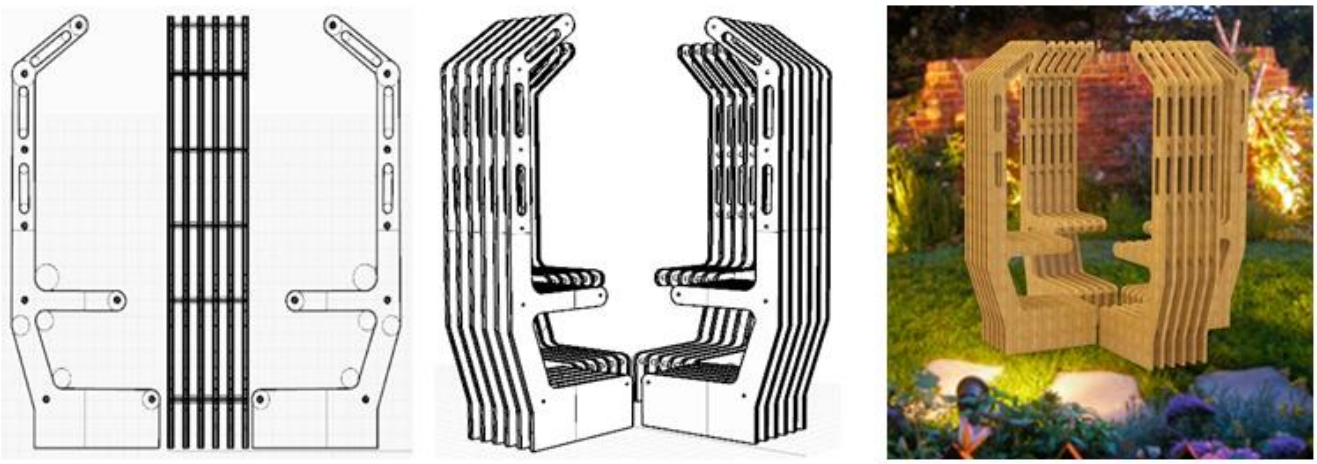


Рисунок 4. Второй вариант проектируемого светильника.

В качестве материала предполагалось использование листовой фанеры. Этот вариант был взят за основу и доработан до конечного решения.

Разработка дизайн-проекта



Рисунок 5. Светодиодный светильник для зон отдыха.

В окончательном варианте в качестве материала для светильника выбрана не листовая фанера, а акриловые прозрачные листы (оргстекло), которые не препятствуют прохождению света, а отражают и преломляют его, усиливая эффект освещения (рис.5).
Свет создают светодиодные гибкие панели, которые вставляются в отверстия светильника, блок питания расположен в нижней части светильника.

Возможна компоновка светильников по два – образуется пространство tet-a-tet, по четыре – образуется своеобразная беседка, а также единичный вариант размещения (рис.6).



Рисунок 6. Варианты использования светодиодного светильника для зон отдыха.

Светильник состоит из плоских деталей, прост в изготовлении и сборке. Каркас светильника собирается из трех видов унифицированных деталей:

1) Основная часть – деталь высотой 2,6 метров,
2) Л-образная деталь,
3) Малая деталь.

Детали 2 и 3 образуют сидение, которым можно дополнить конструкцию. Во всех видах каркасных деталей предусмотрены отверстия для размещения в них гибких светодиодных панелей, которые и обеспечивают освещение. В одном из отверстий в нижней части каркаса располагается блок питания (рис.7).

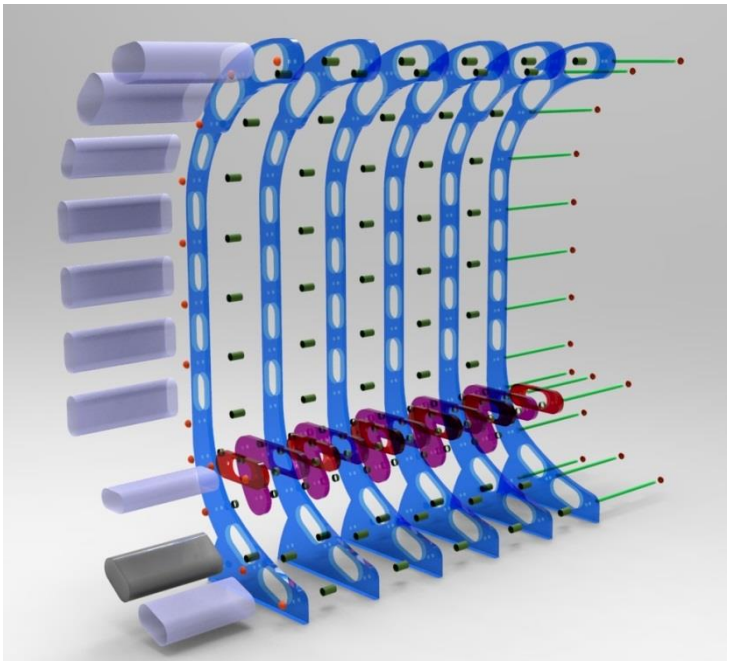


Рисунок 7. Взрыв-схема светодиодного светильника.

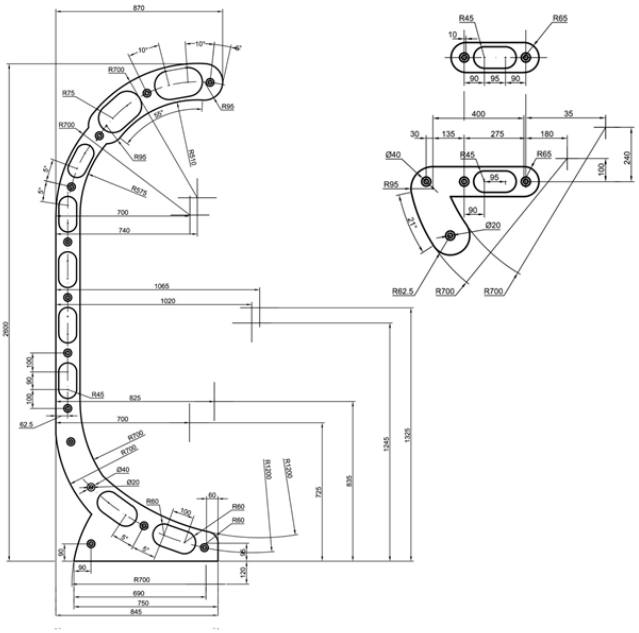


Рисунок 8. Чертеж разработанного светильника.

На основе разработанных чертежей (рис.8) был сделан макет светильника в масштабе 1:5, фотографии которого представлены на рисунке 9.

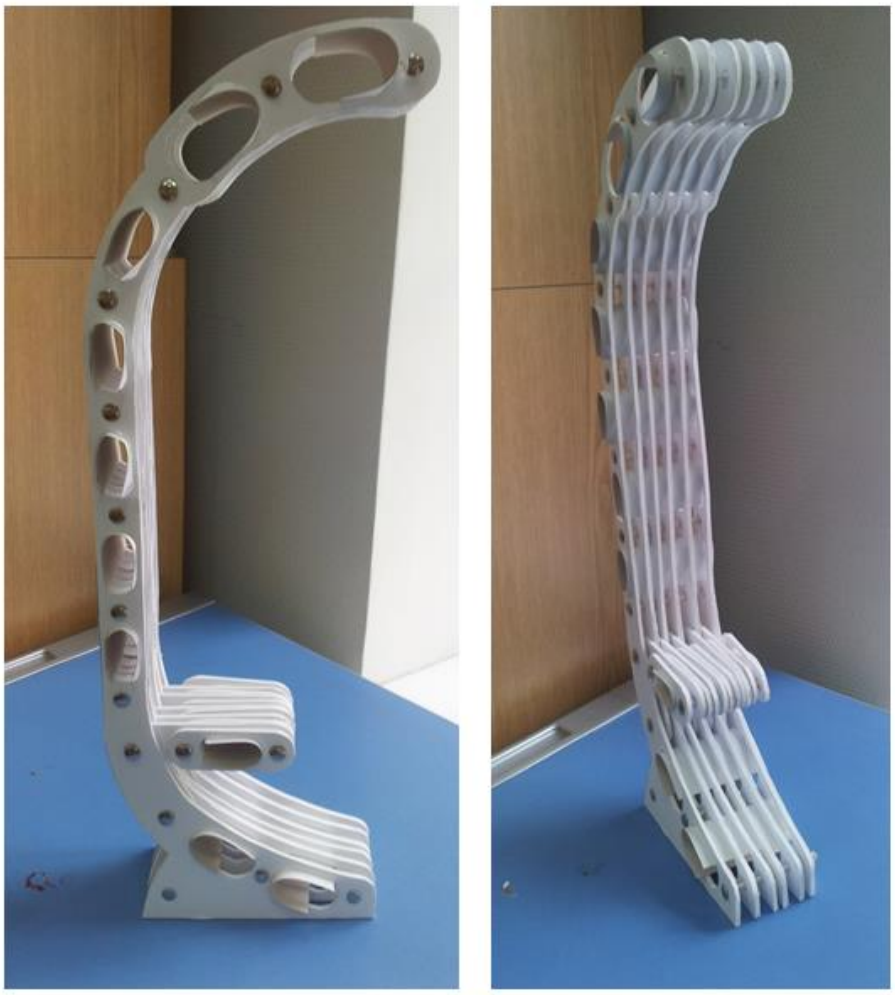


Рисунок 9. Макет разработанного светильника.

Выводы

Разработанный светильник отличается от всех существующих на рынке уличных светодиодных светильников. Он спроектирован с учетом новых возможностей светодиодного освещения, подчеркивает преимущества свечения, учитывает недостатки, создает необычную игру света и тени.

Светильник предназначен как для прямого использования, так и для организации пространства общения, ведь внутри него можно присесть и приятно провести время за беседой. Его можно установить в парках, скверах, дворах, коттеджных посёлках, на дачных участках.

Литература

1. Плюсы и минусы светодиодного освещения [Электронный ресурс]- Режим доступа http://spbled.ru/led/2009-11-05-04-31-45/112-ledds.html
2. Уличные светодиодные светильники – новый взгляд от компании «Церс»[Электронный ресурс] – Режим доступа http://www.metaprom.ru/industry489627.html
3. Уличные светодиодные светильники СДКУ-31[Электронный ресурс]- Режим доступа http://www.snabenergo.ru/id-234/cid-199/catalog.html
4. Каталог светодиодных светильников Philips [Электронный ресурс]- Режим доступа http://www.philips.ru

УДК 658.512.23

РАБОЧЕЕ МЕСТО ОПЕРАТОРА ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА ДЛЯ СТУДЕНЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Екатерина Михайловна Барсукова,
студентка 5 курса,
кафедра «Промышленный дизайн»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: И.Н. Лысенко,
ведущий преподаватель кафедры «Промышленный дизайн»

Перед дизайнерами была поставлена задача создать рабочие места для FabLab МГТУ им. Н.Э. Баумана. FabLab – это небольшая цифровая лаборатория, оснащенная различным оборудованием, в том числе, станками с ЧПУ, предлагающая всем участникам изготавливать макеты, детали и прототипы.

По заданию объект проектирования должен удовлетворять ряду требований, таких как: универсальность, вариативность, модульность, простота, небольшой бюджет на изготовление, эргономичность, интуитивность. Также он должен быть воспроизводим в условиях лаборатории на имеющихся станках.

Моя задача заключалась в проектировании рабочего места для оператора фрезерного станка. Необходимо было разместить сам станок, уже присутствующий в лаборатории, а также освещение, видеокамеры, управляющий компьютер и пылесос для стружки. Ограничивающими факторами стали размеры помещения (ширина комнаты всего 3,5 метра, при этом на станке нужно работать с длинномерными деталями) и невозможность использовать стены и потолок аудитории для крепежа. Стол должен опираться только на пол. Рабочее место должно включать и зоны размещения дополнительного оборудования, такого как: дрель ручная, очки защитные, перчатки, отвертки, фрезы, щетки, ключи, а также другие малогабаритные предметы.

Главное, что я выделила в специфике мебели для FabLab – это функциональность, простота и доступность. В проекте необходимо использовать дешевые и простые в работе материалы, которые можно быстро приобрести и в короткий срок обработать на уже имеющихся мощностях.

Подобные лаборатории все время заполнены людьми. Это значит, что формы моего объекта должны быть безопасными, дружелюбными, мобильными, устойчивыми к износу, позволять работать нескольким студентам одновременно.

Поскольку оборудованием FabLab постоянно пользуются разные люди, рабочее место для него должно быть интуитивно понятным, без всяких осложняющих процесс деталей. Весь функционал очевиден и прост.

Исследование лаборатории МГТУ им. Н.Э. Баумана

Для оценки текущего состояния лаборатории было проведено наблюдение за работой оператора методом фото и видео съемки непосредственно в лаборатории МГТУ им. Баумана.

Был выявлен целый ряд проблем, например, неудобное расположение столов, отсутствие доступа ко всем сторонам станка, низкая столешница для оператора, ограниченный обзор, недостаточное количество места для подручных средств (фрезы, ручной инструмент, очки, щетки и т.д.). В результате исследования техническое задание на разработку рабочего места оператора станка было значительно расширено и откорректировано.



Рис.1. Дизайн-исследование методом наблюдения за процессом использования.

По совету научного руководителя, было решено попробовать организовать пространство по вертикали вокруг центральной оси вращения. При создании формы я опиралась на природные, биологические объекты, а также на некоторые существующие элементы мебели. Попытка позволить рабочим местам вращаться, меняя геометрию так, как это удобно в данный момент времени, показалась мне очень привлекательной. Эта идея и была в дальнейшем принята за основу проекта.

Дизайн-проект

Главная идея проекта – размещение рабочих поверхностей и осветительных приборов вокруг общей оси вращения, которая позволит менять геометрию объекта в случае работы с нестандартными размерами деталей или при транспортировке.

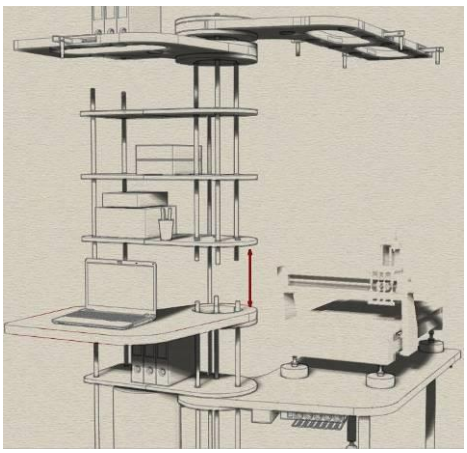


Рис.2. Конструкция

Согласно ТЗ, конструкция должна быть сборно-разборной (центральный крепежный узел позволяет разъединить верхний элемент с освещением и нижний со столешницами, см. рис.2). В процессе разработки была добавлена стойка с полками для архивов и дополнительного оборудования, соединяемая с центральной осью. Она придает дополнительную устойчивость и позволяет разместить больше канцелярии, папок и мелких предметов. Пылесос устанавливается под

полками, его шланг выводится в специальный канал и направляется к станку. Под столешницей для станка расположена труба, на которую можно повесить необходимые в работе со станком очки и средства уборки (щетки, тряпки). Столешница опирается на три дополнительные ножки, оснащенные колесами повышенной прочности со стопорами.

Вертикальная пространственная ориентация проекта требует меньшей площади для размещения большего количества оборудования. Но это не делает нашу задачу проще: при любом варианте не удается на 100% соответствовать техническому заданию. Возможность распила длинномерных деталей противоречит шумозащите, а виброзащита малоэффективна, когда речь идет о легких переносных конструкциях. После попыток примирить конфликтующие друг с другом требования и после анализа других лабораторий, было принято решение пренебречь шумозащитой, а виброзащиту осуществить при помощи опор, используемых в промышленности. Это позволило сохранить эстетику проекта и реализовать решение остальных проблем.

Оператору предлагается работать стоя у столешницы высотой 1100 мм, поскольку он постоянно ходит между станком и компьютером и фактически не имеет возможности сидеть. При желании, можно поставить к столешнице стандартный барный стул. Высокое расположение выравнивает столешницу оператора с рабочей поверхностью станка и обеспечивает хороший обзор. Столешница вращается вокруг центральной оси, что позволяет корректировать ее расположение в случае, если к компьютеру подходит несколько человек.



Рис.3. Дизайн-решение

Распил длинномерной детали

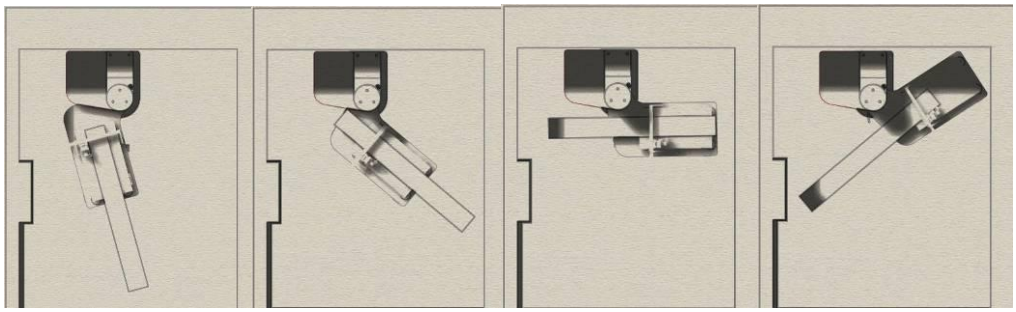


Рис.4. Схемы принципа работы поворотного механизма рабочего места, установленного в аудитории №109, на примере обработки детали длиной 2500мм.

Разворачивая рабочую поверхность станка, мы добиваемся того, что в аудитории шириной всего 3500мм при установке станка на его старом месте, мы можем обработать деталь длиной 2500мм.

Цветовое решение

В ГОСТ 12.4.026-76 «Цвета сигнальные и знаки безопасности» указано, что для предупреждения о возможной опасности используется желтый цвет, преимущественно в сочетании с черным. Оформление данного рабочего места по ГОСТ не является обязательным, однако мне понравилось сочетание цветов, и я решила использовать желто-черную наклонную зебру на торцах столешниц, немного осветлив черный (до 80%). В итоге был принят именно этот цветовой вариант.

Электрика и видеокамеры

Помимо зонального освещения, одним из условий Заказчика было наличие четырех портативных видеокамер для съемки рабочего поля станка. Для установки этого оборудования было решено использовать сборные вращающиеся полки, внутрь которых будет спрятана проводка. По вертикали провода убираются в кабель-канал. В качестве источника освещения используются поворотные галогеновые светильники. Чтобы не допустить перегрева конструкции, отверстия под светильники сквозные, верхняя крышка прорезана в месте расположения трансформаторов. Камеры устанавливаются на специальные выдвижные держатели, что позволит убирать их внутрь полки, когда в съемке нет необходимости.

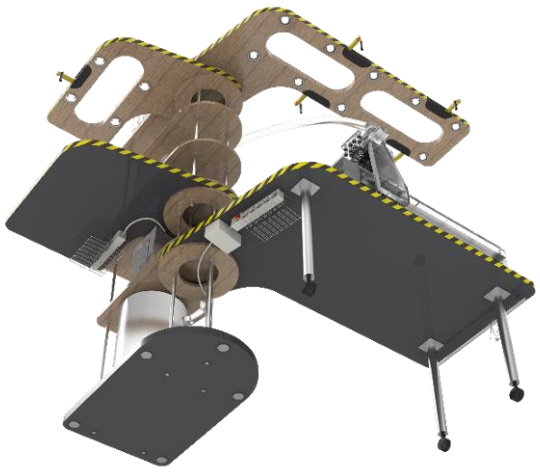


Рис.4. Полки для установки осветительных приборов и видеокамер.

Каждый держатель оборудован кнопкой автоматического выключения при закрывании и сигнальным световым коробом красного цвета, который светится, когда камера работает.

Также для обеспечения удобства использования и дополнительной безопасности требуется наличие одной точки подключения всей конструкции к электропитанию. Для этого под столешницей установлена распределительная коробка с автоматом 20А и УЗО и один общий центральный выключатель. Под каждой столешницей располагается специальный держатель для зарядных устройств, трансформаторов и излишков провода (рис.4). Его можно изготовить из стальной проволоки или приобрести в магазинах ИКЕА.

Выводы

С каждым днем сложность и многогранность поставленных перед промышленными дизайнерами задач возрастает, путь к оптимальному решению становится все более тернистым. Приходится не только создавать и развивать идею, но еще и отсекать по пути к ней все ненужное, убеждая в этом не только себя, но и того, кому эта идея в будущем будет служить. Моей главной проблемой при работе над этим проектом был именно компромисс между возможностью и желанием, перфекционизмом и работающим результатом. Искренне надеюсь, что мне удалось пройти по этой тонкой грани, не отдав предпочтение ни одной из сторон.

Проект был принят и одобрен сотрудниками лаборатории. Его реализация находится в стадии проработки.

Литература

1. ГОСТ 12.1.019-79 Система стандартов безопасности труда.
2. ГОСТ 12.1.003-83 Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности.
3. ГОСТ 12.1.012-2004 Система стандартов безопасности труда. Вибрационная безопасность. Общие требования.
4. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
5. ГОСТ 12.4.026-76 ЦВЕТА СИГНАЛЬНЫЕ И ЗНАКИ БЕЗОПАСНОСТИ.
6. http://jamlab.pro
7. http://www.docload.ru
8. http://hqroom.ru
9. http://www.electro-mpo.ru
10. http://s-awangard.ru
11. http://ru.wikipedia.org
12. http://www.makuha.ru/design/10.htm
13. http://www.helvetica-t.ru
14. Каталог оборудования компании HAEFLE http://russia.hafele.com

УДК 658.512.23

ИССЛЕДОВАНИЯ К ПРОЕКТУ МОДУЛЬНОГО РАБОЧЕГО МЕСТА

Элина Николаевна Голубева,
студентка 6 курса,
кафедра «Промышленный дизайн»
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: М.М. Михеева,
ведущий преподаватель кафедры «Промышленный дизайн»

В настоящее время в мире очень популярны различные виды ручного творчества. Для кого-то рукоделие остается хобби и заполняет досуг. Но для многих оно становится основной статьёй семейного дохода, потому что «хэнд мейд» востребован сегодня как никогда прежде. Потребитель устал от массовой штампованной продукции, повторяющейся во всех магазинах в разных городах и странах. Люди хотят иметь что-то своё, личное, именно для них характерное, неповторимое. И это желание находит прямой отклик любителей нестандартно мыслить и работать своими руками. Об этом свидетельствуют многочисленные мастер-классы, специализированные журналы, сайты и

форумы по интересам. Армия творчески увлеченных людей растет, а их пристрастия перерастают из любительского ранга в профессиональный.

Важным вопросом становится оснащение рабочих мест для такого рода занятий. Поэтому дизайнерскую разработку предваряет исследование видов творчества и рынка соответствующего оборудования.

Виды ручного творчества

Самые популярные на сегодня виды творчества:

1. Вязание.

Ручное – спицами, крючком – или машинное. Рабочее пространство стола для ручного вязания требуется только на этапе построения выкроек или на этапе сборки изделия. Для машинного вязания требуется подставка под вязальную машину. В обоих случаях необходимо место хранения ниток, выкроек и принадлежностей.

2. Вышивка.

Требуется приспособление для фиксирования вышиваемого изделия (пяльцы) и для хранения материала – лент, ниток и другого.

3. Шитьё.

Делится на ручное и машинное. Часто первым этапом идет ручная наметка, затем изделия прошивается на швейной машинке. Шьют многие вещи, начиная от одежды и заканчивая различными игрушками. Рабочее пространство стола требуется на этапе построения выкроек, глажки ткани, раскроя ткани, для швейной машины и принадлежностей к ней.

4. Роспись.

Существует много видов росписи с различными материалами и основами для росписи. Рабочее пространство требуется постоянно – для фиксации расписываемого изделия, и для хранения красок, растворителя, кисточек и других приспособлений. Размер требуемого рабочего пространства зависит от размера расписываемого изделия.

5. Декупаж.

Это техника декорирования различных предметов, основанная на приклеивании рисунка (обычного вырезанного) к предмету, и, далее, покрытии полученной композиции лаком.

Требуемое оснащение и рабочее пространство аналогично оснащению для росписи.

6. Квиллинг.

Это искусство изготовления плоских или объёмных композиций из скрученных в спиральки длинных и узких полосок бумаги.

Рабочее пространство стола требуется постоянно – сначала для скручивания бумажных полосок, затем для их компоновки и приклеивания.

7. Валяние из шерсти

Бывает двух видов – мокрое и сухое .

Для мокрого валяния требуется особое оснащение из-за работы с водой и моющими средствами.

Сухое валяние не требует большого рабочего пространства в процессе работы, но также требует места для хранения рабочих материалов.

8. Плетение

К этому пункту можно отнести все виды плетения – макраме, плетение из бисера, ниток и другие.

Рабочее пространство требуется иногда для крепления начала плетения и для хранения инструмента и материала.

9. Лепка

Для лепки требуется рабочее пространство и пространство для хранения инструмента и принадлежностей. Некоторые виды лепки подразумевают этап запекания – для этого требуется печь.

Популярны и многие другие виды ручного творчества. Каждый из них имеет свою специфику, свои инструменты и требования к рабочему пространству. Для проектирования важно определить, насколько универсальным должно быть рабочее место, чтобы им можно было удовлетворить как можно большее количество людей, занимающихся такими разными задачами.

Кроме того, необходимо учитывать, что большинство из них работает дома в стесненных условиях, кто-то уделяет этому свое основное время, а кому-то рабочее место требуется время от времени.

Существующие решения рабочих пространств для ручного творчества

Существующие решения столов для занятия ручным творчеством либо специализированы – например, столы для работы на швейных или вязальных машинах (рис.1), либо переделаны вручную из другой мебели (рис.2). Имеющиеся в продаже специализированные столы не дешевы и очень громоздки, как правило, они с трудом вписываются в российские малогабаритные квартиры.



Рисунок 1. Специализированный стол для работы на вязальной машинке.

Сколько-нибудь подходящее оборудование для организации удобного рабочего пространства, тем более с возможностью его простого и быстрого «разворачивания», на рынке практически отсутствует. Умельцы выходят из положения за счет приспосабливания того, что уже имеется в доме, под собственные нужды.

Результаты такой самодеятельности очень разнообразны, но чаще всего они также занимают много места и поэтому подходят только для людей, постоянно зарабатывающих на своем рукоделии. Кроме того, для переоборудования мебели нужны соответствующие навыки и возможности, которыми не каждый владеет.



Рисунок 2. Самодельные рабочие пространства для ручного творчества.

Мебель для рукоделия 18-19 веков.

Рукоделие, в особенности для женщин, было популярно издавна, и проблема специальной мебели для него не оставалась без внимания. В музеях сохранились столики, создаваемые для мастериц в 18-19 веках, которые поражают как своей художественной ценностью, так и продуманной функциональностью.



Рисунок 3. Столики рукодельниц 18-19 веков.

Для хранения ниток, пряжи, лент использовались шёлковые мешочки, которые можно было убирать внутрь стола по окончании работы. Рабочее пространство составляла не только столешница, но и выдвижные элементы – в основном, для вышивки и хранения принадлежностей. Некоторые столики в сложенном состоянии использовались как витрина – для демонстрации работ рукодельницы.

Трансформируемая мебель

Для реализации многофункциональности рабочего пространства может использоваться такое свойство мебели, как трансформируемость. Оно особенно актуально для тех, кто занимается творчеством периодически и не может себе позволить постоянное рабочее место в квартире.

В настоящий момент тема достаточно актуальная и развивающаяся, многие дизайнерские решения используют это свойство. Рассмотрим, как оно реализуется.



Рисунок 4. Примеры трансформируемой мебели.

Трансформируемость мебели может достигаться разными способами:

- Часть объекта вынимается из целого по принципу «матрёшки».
- В результате плоскостного сложения и разложения – принцип оригами.
- За счёт перекидных частей мебели.
- В результате выдвигания части плоскости.
- За счёт использования тканей или мягких материалов.

Все виды трансформирования интересны, но в качестве применения к проекту стола для ручного творчества привлекательны наименее громоздкие конструкции, создающее достаточно большое рабочее пространство.

Сейчас люди проводят много времени за столами, которые не отвечают необходимым требованиям. К оборудованию для ручного творчества должны быть применены особые подходы, так как это совершенно нестандартный вид деятельности. Продукция, производимая рукодельницами, востребована, оригинальна и необычна, чего не скажешь о рабочих пространствах, которые предлагаются для них на рынке.

По результатам исследований для предстоящего проекта сделан ряд выводов:

- Специализированная мебель для ручного творчества на рынке отсутствует, эта ниша ничем не заполнена. Разработка ее не только своевременна, но и может оказаться чрезвычайно востребованной.
- Мебель должна быть трансформируемой, чтобы пользователи имели возможность разворачивать и убирать свое рабочее пространство по необходимости.
- Мебель должна быть в достаточной степени универсальной, чтобы удовлетворять нужды людей, занимающихся разными видами творчества.
- Мебель должна быть модульной и состоять из набора унифицированных взаимозаменяемых элементов, чтобы пользователь мог подобрать необходимый ему комплект и сформировать собственное рабочее место с максимально удобным результатом.

Литература

1. В. Папанек «Дизайн для реального мира» - 3-е изд.-изд. Д. Аронов, 416 с.
2. Особенности производства и декора трансформируемая мебель [Электронный ресурс]- Режим доступа http://www.lignaur.ru/pages.htm?id_page=590

3. Как будет выглядеть мебель в будущем [Электронный ресурс] – Режим доступа http://www.rusarticles.com/mebel-statya/kak-budet-vyglyadet-mebel-v-budushhem-5715853.html
4. Стол-тумба для вязальной машины [Электронный ресурс]- Режим доступа http://www.igra-v-biznes.okis.ru/table_vz.html
5. Как правильно оборудовать место для рукоделия? Идеи, чертежи. [Электронный ресурс]- Режим доступа http://www.liveinternet.ru/users/3924481/post297278430/

УДК 658.512.23

СТОЛ ДЛЯ КОЛЛЕКТИВНОЙ РАБОТЫ В СТУДЕНЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Ольга Андреевна Швецова,
студентка 5 курса,
кафедра «Промышленный дизайн»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: И.Н. Лысенко,
ведущий преподаватель кафедры «Промышленный дизайн»

Передо мной была поставлена задача разработки проекта стола для переговоров и коллективной работы в студенческой цифровой лаборатории (FabLab) в МГТУ им. Баумана.

Требование к объекту проектирования: удобство, дешевизна исполнения, возможность производства стола на оборудовании лаборатории, надежность конструкции, интересный дизайн. В ходе обсуждения проекта с сотрудниками FabLab выяснились и другие требования к проекту: габариты имеющегося стола около 700х3000 мм пользователи считают оптимальными и не хотят их уменьшать; стол должен состоять из отдельных модулей, так как планируется ставить такие столы и в другие лаборатории с другими габаритами помещений; наиболее предпочтительный материал – фанера (недорогой и наиболее подходящий материал для фрезерного станка, имеющегося в распоряжении лаборатории). Сотрудники FabLab отдельно подчеркивали необходимость дизайнерского подхода к задаче – им хотелось, чтобы конструкция учитывала требования эргономики, облегчила им ежедневную коллективную и индивидуальную работу и способствовала креативности во время мозговых штурмов, регулярно проходящих за этим столом.

В ходе подготовительной работы по проекту, было проведено дизайн-исследование непосредственно в лаборатории. Исследование включало наблюдение за поведением сотрудников во время коллективной и индивидуальной работы, анализ передвижения людей в помещении, фото и видео метрию.

Дизайн-исследование выявило, что ребята из лаборатории постоянно в движении – даже во время напряженной коллективной работы кто-то встает, чтобы что-то наладить в станке, взять что-то с рабочего стола или отправить почту с компьютера, расположенного в другом конце помещения. При этом отодвинутые от стола стулья полностью перекрывают узкие проходы – передвигаться по лаборатории в такие моменты крайне проблематично. Более того, даже полностью задвинутые под конференц-стол стулья являются дополнительным препятствием при, если за столами для индивидуальной работы, расположенными вдоль стен, работают люди.

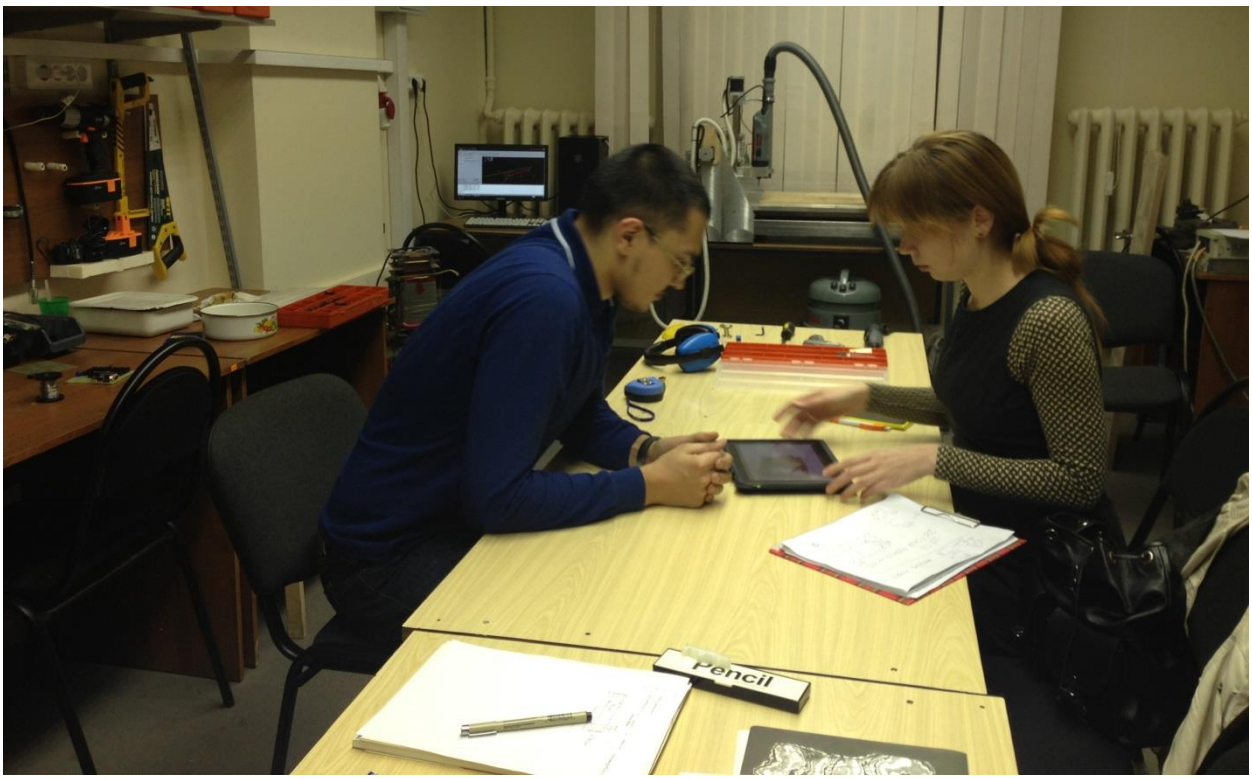


Рис.1. Существующий вариант стола

С учетом проведенного анализа использования стола и выявленного динамического характера совместной работы сотрудников FabLab, мною был предложен вариант высокого стола для работы стоя. Идея была с воодушевлением принята, тем не менее, решено было ограничиться компромиссным вариантом с переменной высотой стола.

Таким образом, финальное техническое задание заключалось в следующем: спроектировать составной модульный стол для коллективной работы, высота которого легко изменялась бы в зависимости от настроения и задач коллектива (высокий стол для динамических мозговых штурмов или эпизодической работы за столом / стандартная высота для традиционной сидячей работы).

Решение

В ходе размышления о механизме изменения высоты, было подмечено, что заданные габариты каждого модуля (700х1000 мм, высота 720/700 мм со столешницей/ без столешницы) таковы, что если повернуть стол на торец, как раз и будет обеспечена необходимая высота стола для работы стоя (высота 1020/1000 мм со столешницей/ без столешницы). Найденное решение оказалось очень привлекательным, так как изменение высоты стола стало возможным без применения каких-либо механизмов подъема столешницы, что делает конструкцию максимально надежной.



Рис.2. Дизайн-решение

Кроме того, полное исключение механических, движущихся деталей ведет к серьезному снижению себестоимости производства. Таким образом, вопрос свелся к поиску оптимальной для переворота формы основания стола и к нахождению простого механизма крепления столешницы к основанию.

Так как в качестве основного конструкционного материала предполагалось использовать фанеру, было решено именно из нее выполнить силовую раму основания: две фанерные рамы прямоугольной формы (толщина фанеры 20 мм) соединяются четырьмя тонкостенными металлическими трубами диаметром 60мм. Крепление труб к раме осуществляется при помощи длинных стяжек и гаек.



Рис.3. Варианты использования

Таким образом, конструкция основания представляет собой параллелепипед с закругленными углами, торцевые ребра которого образуют металлические трубы. Именно такая форма как бы подсказывает пользователю, как правильно нужно перевернуть основание, чтобы изменить высоту стола. Столешница, также выполненная из 20 мм фанеры, устанавливается на основание и крепится шкантами. При изменении высоты

столешница снимается и затем устанавливается так же на шканты на уже перевернутое основание.



Рис.4. Конструкция

В этом проекте, как мне кажется, удалось создать максимально простую и в то же время оригинальную конструкцию, отвечающую требованиям заказчика. Фанерные детали дёшевы, доступны, легко фрезеруются, а все крепежные элементы стандартные и недорогие. Конструкция полностью отвечает духу движения FabLab – простота, легкость изготовления на станках лаборатории, креативность. Уверена, что дизайн оправдает себя в реальных условиях ежедневной работы лаборатории, задаст новый, динамический тон работы, добавит творческой активности мозговым штурмам.

Литература

1. http://jamlab.pro
2. http://ru.wikipedia.org
3. Каталог оборудования компании HAEFLE http://russia.hafele.com

ДИЗАЙН-ИССЛЕДЛОВАНИЕ ОБЪЕКТА МАЛОЙ ФОРМЫ

Анна Евгеньевна Ушакова[(1)], Максим Эдуардович Власов[(2)],
студентка 4 курса,
факультет «Машиностроительные технологии»,
кафедра «Промышленный дизайн»[(1)],
студент 2 курса,
факультет «Биомедицинская техника»,
кафедра «Биомедицинские технические системы»[(2)],
Московский государственный технический университет Н.Э. Баумана

Научные руководители: Н.Ю. Терехова,
доцент кафедры «Промышленный дизайн»,
А.С. Синельников,
преподаватель кафедры «Промышленный дизайн»

Дизайн-исследование объекта малой формы было проведено на примере чайного пакетика. «Чай - это произведение искусства, которое нуждается в руке мастера, чтобы проявить свои благороднейшие качества» - это слова японского ученого Окакура Какузо, который занимался развитием искусств в Японии. Вне Японии его в основном помнят, как

автора "Книги Чая" (The Book of Tea). Считается, что предшественник чайного пакетика был изобретён торговцем Томасом Салливаном в 1904 году, причём совершенно случайно. Традиционно чай продавали в больших жестяных банках, но Салливан решил, что будет выгоднее использовать мелкую расфасовку, а в качестве тары применил шёлковые мешочки. Нью-йоркские рестораторы обнаружили, что чай в новой упаковке удобно заваривать прямо в мешочке. Затем этот способ заваривания распространился по всему миру, шёлк был заменён на более дешёвую марлю, а навеска чая уменьшилась до одной порции. Пакетированный чай стал широко использоваться во многих странах.

Целью дизайн-исследования объекта малой формы является поиск интересных решений заваривания чая как с использованием чайного пакетика, так и без него. Основными этапами исследования являются: анализ аналогов, выбор и проработка лучшего варианта, а также поиск новой концепции чайного пакетика.

Дизайн-исследование производилось среди отечественных и зарубежных производителей пакетированного чая. Были выявлены специфические особенности упаковки чая. Их существует огромное количество, причем в виде необычных конструкций. Некоторые варианты существующих решений аналогов представлены на рисунке.



Рис.1

Часто говорят о «правильном» способе заварки чая, но он у каждого индивидуален. Кто-то заваривает чай в чайнике из исинской глины и только родниковой водой, а кто-то просто заваривает чай в термосе горячей водой из под крана. И все при этом получают удовольствие. Сколько людей, столько мнений!. Технология самого простого способа заваривания чая такова: Кипятят воду до появления больших пузырьков.Температура заваривания чая должна быть около 95°С для таких сортов как Пуэр, Красный чай, Да Хун Пао и других сильноферментированных улунов. Температура заваривания сортов Те Гуанинь, Алишань и другие слабоферментированные улуны Около 90°С . Желтые и белые чаи требуют температуру заварки 85°С , а зеленые чаи - 80°С. Необходимо наполнить горячей водой сосуд , где уже лежит чай (на 150 мл воды берут небольшую щепотку чая), и закройте крышкой. Через 10 минут слейте настой в другую чашку. Для этого лучше воспользоваться ситечком. Чай готов – можно наслаждаться вкусом и ароматом свежеприготовленного чая.

Необходимые условия для того, чтобы чай получился хорошим:

- Хороший качественный чай и свежая вода
- Удобная и чистая посуда из керамики или стекла
- Прогретый заварочный чайник

- Свежеприготовленный кипяток
- Соответствующая сорту чая температура заваривания
- Точное количество сухой заварки
- Оптимальное время настаивания

Это особенно актуально с позиции употребления чайного напитка подавляющим большинством людей на планете. Готовый чайный напиток согласно многим разносторонним исследованиям содержит в своем составе большое количество биологически активных веществ, которые оказывают комплексное воздействие на организм человека. Такое воздействие происходит несколькими способами. Во-первых, при помощи непосредственного попадания различных веществ, входящих в химический состав чая, внутрь организма человека при употреблении напитка. Вторым, менее очевидным способом, является вдыхание с ароматом чая эфирных масел. Обработка ран кожного покрова человека специально приготовленными растворами на основе чайных листьев также способствует проникновению биологически активных веществ в организм человека. Процесс чаепития оказывает воздействие на общее и эмоциональное состояние человека. Таким образом, употребление такого повседневного напитка, как чай, не только благотворно влияет на человека, но и является профилактическим и даже лечебно-медицинским средством. Каждый вид и сорт чая содержит разные соотношение количества и комбинацию тех или иных веществ. К характерным группам таких веществ относятся дубильные вещества, эфирные масла, алкалоиды (в первую очередь чайный кофеин), белки и аминокислоты, биологические пигменты и витамины. Все это и определяет процедуру применения напитка, получаемого завариванием листа чайного листа, в каждом случае с учетом уникальных особенностей конкретного человека и традиций чаепития.

На Востоке считают, что вкус чая напрямую связан с энергетикой и настроением конкретного момента. Заваривание чая требует концентрации внимания и особого душевного подъема. Поэтому необходимо пить чай, только когда этого действительно хочется, и только те чаи, которые нравятся.

Но большинство из нас не соблюдают всех традиций чайных церемоний и для экономии времени пьют чай, используя чайные пакетики.

Достоинства чайных пакетиков выражаются, в основном, в повышении удобства и времени приготовления чая:

- Не требуется никакой дополнительной посуды, кроме питьевой, а также нет необходимости в дозировании чая, поскольку вся процедура заваривания заключается в заливании пакетика кипятком;
- Заварка не даёт чаинок;
- Пакетированный чай удобен в дороге, когда нет возможности заварить обычный чай.
- Использование пакетиков в заведениях общественного питания даёт определённую гарантию качества чая и отсутствия в нём посторонних примесей. Как правило, такой чай заваривается непосредственно клиентом, либо в его присутствии, а после употребления пакетик выбрасывается. Это исключает подмену одного чая другим, уменьшение закладки сухого чая, добавление соды, вываривание старой заварки;
- Использованные чайные пакетики удобно выбрасывать, что существенно в условиях офиса, где не всегда удобно избавляться от заварки и мыть заварочные принадлежности.

В ходе дизайн-исследования были выявлены следующие проблемы:

- Пакетик часто падает в кружку вместе с этикеткой
- Чайный пакетик часто некуда выкинуть, и приходится пить очень крепкий чай
- Пакетик постоянно капает

- Пакетированный чай гораздо дороже, чем такой же по качеству байховый, поскольку выше цена его упаковки.
- Пакетированный чай менее ароматен, так как при хранении маленькими порциями в воздухопроницаемых пакетиках он быстро выдыхается. Ароматизация скрывает этот недостаток, но она не может заменить естественный аромат чая. Дополнительная герметичная упаковка каждого пакетика устраняет проблему, но ещё больше поднимает цену чая.
- Бумага пакетиков содержит клеящие вещества, придающие чаю нехарактерный привкус. Качественная фильтровальная бумага свободна от этого недостатка, но нельзя утверждать, что именно её применяют во всех случаях все производители пакетированных чаёв.
- Можно встретить утверждение, что вкусовые качества чайных листов только тогда полностью раскрываются, когда они свободно плавают в воде.
- Любители чая часто считают сам факт употребления пакетированного чая признаком низкой культуры.
- На изготовление пакетированного чая иногда идут отходы чайного производства: пыль, крошка, получающиеся припроизводстве байхового чая, хотя объективно эти отходы по составу мало чем уступают чаю, при изготовлении которого они получаются.

На рисунках (рис.2-рис.8) представлены аналоги пакетиков чая, разработанные российскими и зарубежными компаниями, такими как TrendHunter, Thinkgeek, Vacuvin и другими.



Рис.2



Рис.3



Рис. 4



Рис. 5



Рис. 6



Рис.7

Аналог чайного пакетика с названием TeaTanic, разработанный компанией ThinkGeek в честь легендарного корабля Титаник, представлен на Рис.8. В него насыпается то количество чая, которое необходимо для оптимального заваривания чая.



Рис.8

На рисунках (Рис.9-Рис.11) представлены приспособления для выжимки пакетика:



Рис.9



Рис.10



Рис.11

На рисунках (Рис.12- Рис.14) показаны различные способы хранения чайного пакетика:



Рис.12



Рис.13



Рис.14

В результате проведенного дизайн-исследования был сделан вывод, что все разработанные на настоящий момент конструкции для пакетированного чая имеют как недостатки, так и достоинства. Необходимо также отметить, что при проведении дизайн-исследования даже такого объекта малой формы, как чайный пакетик, следует принимать во внимание не только его потребительские характеристики, но и воздействие самого чайного листа на организм человека Наиболее интересным вариантом можно считать разработанный компанией «Trendhunter» таймер для заварки чая, который представлен на рисунке 15:



Рис.15

Литература

1. В. Папанек. Дизайн для реального мира. – М.: Д.Аранов, 2012.
2. Лора Слэк. Что такое дизайн продукта? - Серия: Справочники по основам дизайна, - АСТ, Астрель, 2008 г.
3. Н. Райли. Элементы дизайна. – М.: Магма, 2004.
4. Судаков К.В. Физиология. Основы и функциональные системы: Курс лекций — М.: Медицина, 2000 - 784 с.
5. http://www.thinkgeek.com
6. http://www.trendhunter.com
7. http://www.jonastrampedach.com/

Секция X

Оборудование и технологии прокатки

Председатель:	**Семенов Иван Евгеньевич,** д.т.н., профессор кафедры «Оборудование и технологии прокатки» (МТ-10)
Ученый секретарь:	**Шинкарев Александр Сергеевич,** ассистент кафедры «Оборудование и технологии прокатки» (МТ-10)

УДК 669.019.02/09

ОРГАНИЗАЦИЯ ТО И Р МНЛЗ АНРиПСиС (МЗ ЭЛЕКТРОСТАЛЬ)

Денис Юрьевич Дронов,

Студент 6 курса
кафедра «Оборудование и технологии прокатки»
Московский государственный технический университет

Научный руководитель: А.А. Мальцев,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технологии прокатки»

Объектом изучения и теоретического исследования является машина непрерывного литья заготовки (МНЛЗ) агрегата непрерывной разливки и прокатки стали и сплавов (АНРиПСиС), расположенного в сталеплавильном цехе №3 (СПЦ-3) металлургического завода «Электросталь» (ОАО МЗ «Электросталь»). В здании цеха СПЦ-3 размещен только один агрегат АНРиПСиС, который производит бунтовый прокат круглого профилеразмера Ø 8…10 мм, как поставляемый заказчику, так и потребляемый внутри завода прокатным цехом №2 (ПЦ-2). Производство характеризуется сложностью марочного состава, включающего высоколегированные нержавеющие, жаропрочные и коррозионностойкие и прецизионные сплавы.

Кроме МНЛЗ агрегат АНРиПСиС включает в себя две индукционные установки, задающую и планетарные клети, шестиклетьевую группу с моталкой (рис.1).



а *б*

Рис 1. Агрегат АНРиПСиС: *а* — вид на планетарный стан 100; *2* — вид на МНЛЗ

МНЛЗ радиального типа производит заготовку 60 × 80 мм в виде непрерывно-литого слитка (рис. 2).

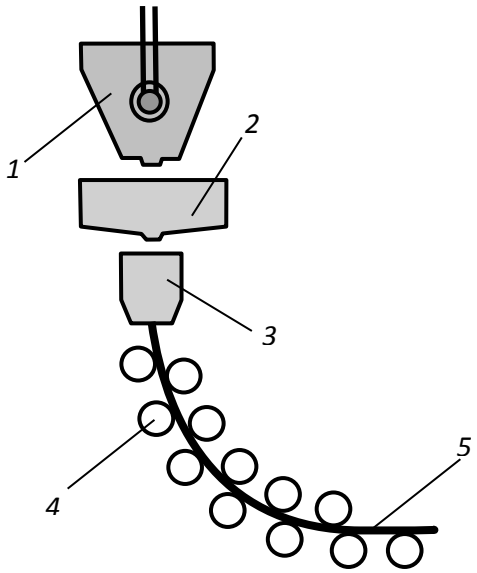


Рис. 2. Радиальная МНЛЗ: 1 — сталеразливочный ковш; 2 — промежуточный ковш; 3 — кристаллизатор; 4 — рольганг; 5 — непрерывно-литой слиток

МНЛЗ работает следующим образом. Выплавленную сталь выпускают из сталеплавильной печи в сталеразливочный ковш, который удерживается за две цапфы литейным краном. Через отверстие на дне сталеразливочного ковша жидкий металл поступает в промежуточный ковш, где осуществляется подогрев, перемешивание и дополнительное легирование металла. После открытия стопора промежуточного ковша металл через сливное отверстие поступает в кристаллизатор, в котором застывают стенки отливки и на ней образуется корка. Формирующийся непрерывно-литой слиток с еще жидкой сердцевиной медленно вытягивается из кристаллизатора на рольганг, представляющий собой дуговой участок ручья.

Рольганг состоит из массивных холостых роликов и форсунок, подающих охлаждающую воду на поверхность непрерывно-литого слитка. Ролики предохраняют слиток от выпучивания его корочки вследствие высокого давления. В результате интенсивного охлаждения корочка быстро твердеет и нарастает.

После выхода на прямолинейный участок непрерывно-литой слиток (заготовку) разрезают ножницами на мерные длины.

Непрерывно-литой слиток, полученный на МНЛЗ, благодаря своей сравнительно малой толщине и быстрому затвердеванию отличается меньшей химической неоднородностью, более равномерным распределением неметаллических включений, чем слиток, застывший в изложнице. Поверхность непрерывно-литого слитка более чистая и гладкая, хотя может содержать поверхностные и внутренние трещины.

Главная задача МНЛЗ — производство качественного непрерывно-литого слитка, а главная задача технического обслуживания и ремонтов (ТО и Р) этой МНЛЗ — обеспечение безаварийной работы оборудования.

Несмотря на совершенствование оборудования и технологий, число аварий и уровень травматизма на МНЛЗ остаются высокими.

При эксплуатации МНЛЗ могут возникнуть следующие аварийные ситуации, обусловленные недостатками конструкции (табл.)

Таблица. Виды аварий МНЛЗ и мероприятия по их устранению

Авария	Причины	Устранение и ремонт
Перелив металла через верх кристаллизатора	Невнимательность разливщика	Остановить ручей, очистить кристаллизатор от остатка наплыва
Отрыв затравки от заготовки	Преждевременный пуск ручья, износ головки затравки, перерыв струи	Остановить ручей, вывести затравку
Проход металла через футеровку промежуточного ковша	Износ футеровки, перегретый металл	Закрыть шиберный затвор стальковша, переместить промежуточный ковш в резервное положение
Зависание слитка в кристаллизаторе	Прилипание (приварка) корочки слитка, вызванная засорением канала охлаждения кристаллизатора	Кратковременно остановить машину с перекрытием подачи металла в кристаллизатор, затем запустить с малой скоростью
Неполноценная струя металла, вытекающая из стакан-дозатора	Образование «козелка» в канале стакан- дозатора кислородом	Прожечь канал стакан-дозатора кислородом
Прорыв металла под кристаллизатором	Зависание корочки слитка в кристаллизаторе	При резком понижении уровня металла в кристаллизаторе, хлопках, появлении зеленого пламени под кристаллизатором прекратить подачу металла, продолжить извлечение блюма после прорыва, чтобы избежать его застывания внутри машины

Во избежание вышеперечисленных аварийных ситуаций необходимо принять комплекс мер, среди которых основную роль играет правильная организация ТО и Р оборудования МНЛЗ с установкой современной аппаратуры для диагностики его технического состояния (ТС).

Во время прохождения студентами производственной практики в СПЦ-3 было установлено, что основной причиной простоев АНРиПСиС является прорыв металла на выходе из кристаллизатора.

Анализ формирования непрерывно-литой заготовки показал, что расплавленный шлак попадает между формирующейся коркой сляба и стенками качающегося кристаллизатора. Этот шлак — отличная смазка, не дающая корке сляба прилипать к стенкам кристаллизатора. Струя жидкого металла ($1450\ ^0C$) способна размывать корку, в результате чего корка местами прилипает к стенкам кристаллизатора. В корке образуются трещины, приводящие, в лучшем случае, к браку непрерывно-литого слитка, а в худшем случае — к прорыву жидкого металла на выходе из кристаллизатора, что является серьёзной аварией, требующей ремонта оборудования. Поэтому профилактика прорывов вызывает огромный интерес [1,2].

Для уменьшения трения между непрерывно-литой заготовкой и стенками кристаллизатора подается смазка в виде разнообразных масел или парафина. Локальные прилипания корки к стенкам кристаллизатора также можно избежать путем добавления подачи шлака. В случае возникновения прилипания увеличивается сила, приложенная к кристаллизатору со стороны непрерывно-литой заготовки; эту силу предлагается измерять тензометром.

Кроме того, предлагается применять термопары, установленные по высоте кристаллизатора, и тепловизоры для контроля температурного поля непрерывно-литой заготовки на выходе из кристаллизатора.

В работе предлагается заменить гильзовый кристаллизатор на сборный. Гильзовый кристаллизатор, установленный на МНЛЗ, изготовлен из медной цельнотянутой трубы. В отличие от него, сборный кристаллизатор имеет четыре медные рабочие стенки, каждая из которых крепится шпильками к жесткой стальной плите. Конструкция сборного кристаллизатора позволяет варьировать поперечный размер непрерывно-литой заготовки путём перемещения стенок.

Для организации безопасной работы оборудования и агрегатов на металлургическом предприятии создается система управления промышленной безопасностью, обеспечивающая выполнение ряда организационных и технических мероприятий, направленных на своевременное выполнение требований промышленной безопасности, мониторинг технического состояния оборудования и агрегатов и снижение риска возникновения аварий. Благодаря прогрессу в развитии технологий МНЛЗ всё более автоматизированы и механизированы: большинство средств управления вынесены на безопасные участки, благодаря множеству различных датчиков (конечные выключатели, командоаппараты, магнитогерконовые датчики, фотореле, радиоактивные датчики), термоизмерительных зондов, а также современных вычислительных средств стало возможным производить максимальный анализ готовности оборудования и протекания процесса разливки стали [3].

Отечественные металлургические заводы всё чаще отказываются от непрофильного ТО и Р и переходят на аутсорсинг.

Аутсорсинг — это передача заводом функций ТО и Р фирме, которая специализируется в этой области, на определённый в контракте срок времени. Фирму, берущую на себя функции ТО и Р принято называть аутсорсинговой, или аутсорсером. Но для снижения аварийности МНЛЗ не достаточно учредить новое юридическое лицо и сосредоточить в нем весь квалифицированный ремонтный персонал. Необходимо правильно организовать саму систему ТО и Р, создать диагностическую аппаратуру, позволяющую точно прогнозировать остаточный ресурс деталей и узлов оборудования.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана под руководством профессора Вафина Р.К. разрабатывалась система диагностики и мониторинга ТС металлургических машин (Мониторинг ТС МЕТМАШ), использование которой на МНЛЗ агрегата АНРиПСиС дало бы значительный экономический эффект [4]. Велись активные работы над

совершенствованием методики расчета усталостной долговечности элементов прокатных станов. Подбирался коллектив из сотрудников и студентов для ТО и Р оборудования различных металлургических предприятий.

В последнее время в рамках курсового и дипломного проектирования прокатных станов помимо задачи совершенствования конструкции металлургического оборудования, удовлетворения экологических требований и требований по охране труда, а также задач повышения технологичности и экономической эффективности производства, студентам всё чаще ставится задача улучшения организации ТО и Р объекта, предусматривающая компоновку диагностической аппаратуры.

Для решения поставленной задачи авторами предлагается аппаратура, включающая каналы измерения температуры, вибрации и крутящего момента. Особое внимание уделено вопросу контроля температурного поля непрерывно-литой заготовки тепловизором с целью предупреждения возникновения трещины в корке, приводящей к прорыву металла под кристаллизатором. Также необходим контроль за наиболее изнашиваемыми частями футеровки ковшей МНЛЗ, что позволит вовремя выявить максимальный износ огнеупоров и не допустить прогара брони ковшей.

Современные тепловизоры оснащены устройством, которое высвечивает на экране изотермические поверхности, и устройством для измерения выходного сигнала, значение которого функционально связано с измеряемой температурой поверхности.

Методика работы с тепловизором основана на методе теплового неразрушающего контроля, что позволит в течение часа провести натурное обследование МНЛЗ. Основными характеристики тепловизора являются: температурное разрешение, размер и скорость формирования изображения, диапазон измеряемых температур, спектральный диапазон и расход энергии.

На верхних участках МНЛЗ рекомендуется применять, например, высокочастотный пирометр «Термоскоп 800 – 2С» ООО «ИНФРАТЕСТ» (http://www.infratest.ru/files/prokat.pdf).

Другой вариант — пирометр серии Metis MW, разработанный специально для непрерывного измерения температуры в камерах распыления МНЛЗ (http://www.sensortherm.de/ru/node/109). Согласно инструкции «… при измерении температуры прокатной полосы пирометр устанавливается снизу, что исключает воздействие на измерение температуры окалины, воды или пара. Сигнал подается по гибкому, плетеному, герметически защищенному кабелю в блок обработки сигнала, который может быть установлен дистанционно в менее жёстких условиях окружающей среды, например в щитовой шкаф…».

Вспомогательный канал измерения вибрации необходим для обнаружения изменений вибрационного состояния в процессе эксплуатации механизма качания кристаллизатора. Причинами изменений вибрационного состояния в большинстве случаев являются дефекты. В предлагаемой диагностической аппаратуре, поскольку она пока не включена в систему аварийной защиты, используется один канал измерения вибрации, к которому последовательно подключаются все используемые датчики вибрации. Число точек контроля сведено к минимуму, до одной – двух на каждый объект мониторинга, имеющий общий корпус. Такой подход существенно снижает стоимость аппаратуры без существенного снижения достоверности получаемых результатов.

Сам канал измерения вибрации включает акселерометр на магнитной присоске и модуль усилителя сигнала с выходом на АЦП. Акселерометр — датчик ускорения сейсмического типа у которого отсутствует связь с неподвижной опорой. Действие датчика основано на преобразовании силы, возникающей при ускоренном движении инерционной массы в электрический заряд; преобразователем является пьезоэлемент. Усилитель сигнала с моста реализован на основе операционного усилителя с отрицательной обратной связью. В качестве индикатора вибрации пока используется телефон, дающий возможность качественно охарактеризовать уровень вибрации. Для

получения цифровой оценки виброускорения в дальнейшем пранируется применить виброметр.

Литература

1. Пиксаев А.В., Хребто В.Е., Бодяев Ю.А., Вдовин К.Н. Механизм качания кристаллизатора слябовых МНЛЗ. Конструирование и расчет. Монография. Магнитогорск: МГТУ, 2001. 87 с.
2. Бирюков А.Б. Современные аспекты теплового мониторинга работы МНЛЗ // Металл и литье Украины. 2008. № 7-8. С. 37- 40.
3. Лубнин И. И. Разработка основных положений концепции роботизации МНЛЗ. [Электронный ресурс] // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Студенческая весна 2013: Машиностроительные технологии». М.: МГТУ им. Н.Э Баумана. 2014.
4. Дронов Д. Ю., Иконников Д. А. Система мониторинга остаточного ресурса МНЛЗ и прокатных станов. [Электронный ресурс] // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Студенческая весна 2013: Машиностроительные технологии».– М.: МГТУ им. Н.Э Баумана. 2014.

УДК 621.774.21

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ КЛЕТИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОЙ ВАЛКОВОЙ ФОРМОВКИ ТРУБ ИЗ СТАЛЕЙ ВЫСОКОГО КЛАССА ПРОЧНОСТИ

Даниил Андреевич Иконников,
Студент 6 курса,
кафедра «Оборудование и технологии прокатки»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: О.В. Соколова,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технологии прокатки»,

В связи с активным развитием нефтегазовой добывающей промышленности возрос спрос на прямошовные сварные трубы различного сортамента. Современные условия эксплуатации труб предполагают наличие низких температур, высокого давления и агрессивных сред. К трубам предъявляются высокие требования по физико-механическим характеристикам, химическому составу, точности формы и размеров, качеству поверхности готового изделия. В связи с этим к современным трубоэлектросварочным агрегатам (ТЭСА) предъявляются следующие технологические требования:

1.Обеспечение гибкости производства, т.е. возможности быстрого перехода на производство труб различного сортамента.

2.Обеспечение требуемого качества труб из сталей повышенного класса прочности.

Формовочный стан является участком технологической линии, который наиболее сильно влияет на выполнение современных требований, предъявляемых к ТЭСА. Главной задачей для обеспечения требуемого качества является создание монотонного очага деформации при формообразовании труб.

При создании современного оборудования обеспечение устойчивого процесса формовки в основном достигается разработкой нового рабочего инструмента. Конструкции же формовочных клетей, а также конструкции узлов осей валков, не претерпевают каких-либо серьезных изменений.

Цель данной работы заключается в определении степени влияния конструкции клетей на устойчивость процесса формовки нефтегазопроводных труб.

В большинстве случаев предприятия используют старое оборудование, формовочные клети которого представляют собой пару валков необходимой для деформации штрипса формы, расположенные в пространстве станины (рис.1).

Конструкция формовочных клетей с закрытым типом калибра аналогична конструкции клетей с открытым типом калибра. Отличие составляет лишь дополнительная пара рабочего инструмента. В результате калибр состоит из четырех формующих валков. [4]

Конструкция клетей, описанных выше, широко распространена ввиду ее простоты, поэтому систему подобной этой принято считать «классической». Использование оборудования данного типа позволяет массово производить трубную продукцию с редкими остановками для перевалки и установки нового комплекта валков при переходе на производство другого типоразмера. Данные клети внедрялись повсеместно с начала 60-х годов, когда в стране шел процесс создания системы нефтяных и газовых трубопроводов.

На сегодняшний день, год от года растет спрос на трубы различного сортамента, что связанно с развитием различных отраслей промышленности. Требуется увеличение не только производительности трубных станов, но и их маневренности, то есть способности быстро перенастраиваться с одного размера труб на другой, с одного материала заготовки на другой. Однако, многие трубоэлектросварочные агрегаты (ТЭСА), построенные еще в прошлом тысячелетии, не рассчитаны на производство большого объема прямошовных электросварных труб различного типоразмера. Поэтому значительная часть существующих ТЭСА подлежат модернизации и реконструкции. Так же, следует отметить, что с ростом спроса на производство труб нефтегазового сортамента, повышаются и требования, предъявляемые к данному виду продукции металлургических предприятий. В основном это касается увеличения толщины стенки трубы, а также использование материалов с повышенными механическими свойствами.

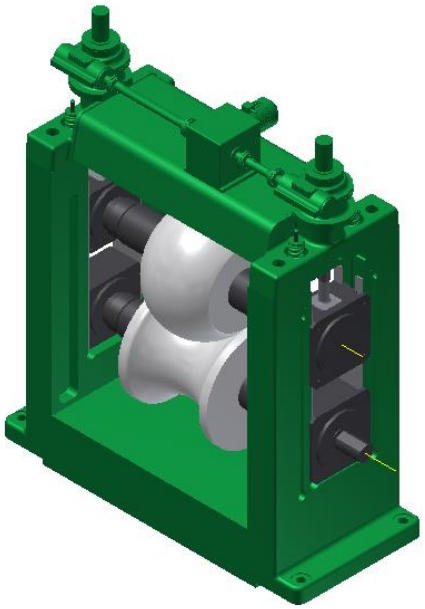


Рис. 1. Формовочная клеть с открытым типом калибра

Данные обстоятельства заставляют искать способы модернизации уже существующих трубоэлектросварочных агрегатов, так как не многие отечественные компании располагают возможностями увеличения объема производства путем введения в эксплуатацию новых линий и цехов по производству труб.

В основном изменения связанны с уже существующим оборудованием формовочного стана. Так как именно процесс формовки отвечает за производство качественной трубной заготовки, основные изменения касаются клетей формовочного стана трубоэлектросварочного агрегата.

В большинстве случаев приходится реконструировать большую часть оборудования, для получения необходимых условий протекания технологического процесса. В некоторых случаях, недостаточную длину формовочного стана компенсируют увеличением числа клетей, которые должны обеспечить устойчивый процесс формообразования трубной заготовки и избежание получения брака. В процессе модернизации инженеры вынуждены решать различные технологические задачи для обеспечения получения качественной продукции различного типоразмеров. Одной из таких задач является обеспечение устойчивости процесса формоизменения трубной заготовки.

Одним из способов модернизации существующих «классических» формовочных станов является введение в состав комплекса оборудования эджерных (рис.2) и кромкогибочных клетей, внедрение которых отличается малой стоимостью и простотой.

Дополнительные клети, входящие в данный комплекс оборудования, не только направляют трубную заготовку в последующую клеть, предотвращая тем самым смещение полосы относительно оси формовки, но также позволяет нивелировать распружинивание металла после выхода из формовочных клетей. Тем самым предотвращая образование таких дефектов как излом и гофрообразование.



Рис. 2. Эджерная клеть

Особого внимания заслуживает экспериментальная кромкогибочная клеть конструкции Электростальского завода тяжелого машиностроения (ЭЗТМ), которая была изготовлена для трубоэлектросварочного агрегата 203-530 ОАО “Выксунский металлургический завод» (рис.3).



Рис. 3. Кромкогибочная клеть конструкции ЭЗТМ

Предполагаемое использование данной клети в технологическом процессе в межклетевом пространстве между группами клетей отрытого и закрытого типа. Формовочное оборудование данной конструкции позволяет доформовывать трубную заготовку, избегая тем самым получение таких дефектов как излом, образование крыши. Проведенный анализ применения формовочного инструмента показал, что использование трех дополнительных пар валков в межклетевом пространстве позволяет стабилизировать непрерывный процесс формообразования трубной заготовки. Конструкция рассматриваемой клети имеет механизм смены положения кромкогибочных роликов в пространстве, что говорит об универсализме данного типа оборудования. Возможно, более продолжительные испытания данной клети позволили бы сотрудникам ЭЗТМ внедрить конструкции данных клетей в комплекс оборудования существующих ТЭСА различной серийности, что позволило бы увеличить производимый сортамент продукции как по геометрическим размерам, так и по марочному диапазону сталей.

Использование кромкогибочных клетей совместно с классическими формовочными клетями позволило бы существенно сократить пар валкого инструмента, а также исключить перевалки на комплексе оборудования, когда производимый типоразмер не меняется, меняется лишь свойства материала, путем использования регулирования положения валков в кромкогибочной клети. Наличие данной возможности позволяет корректировать поведение трубной заготовки в очаге деформации не прибегая к замене валкового инструмента на основных клетях формовочного стана.

Тенденции современного рынка трубосварочной продукции обязывает заводы-производители расширять размерный ряд выпускаемой продукции. Потребителю зачастую необходима ограниченная партия труб. Данная ситуация вынуждает искать пути перехода существующего оборудования, предназначенное на массовый выпуск труб, на серийное производство продукции.

В связи с этим с каждым новым днем большую популярность получает технология гибкой формовки по названием Cage Forming. Суть данной технологии заключается в симбиозе существующих программных средств управления и использование так называемой универсальной формовки для заданного диапазона размеров. Данная технология позволяет перейти с одного типоразмера на другой в считанные минуты, используя средства управления положением валкового инструмента. Время же перевалки и настройки стана «классической» конструкции занимает более 8 часов на мелкосортных трубных станах и более 48 часов на комплексе оборудования для производства труб среднего и большого диаметров [3].

На сегодняшний день в мире существует три компании, которые реализуют технологию Cage Forming в конструкциях трубоэлектросварочных комплексов: Olimpia'80 (Италия), NAKATA (Япония) и SMS Meer (Германия).

Рассмотрим пример использования данной технологии каждой из компаний.

По анонсам компании Olimpia'80 технология универсальной формовки с изменяющейся конфигурацией валков открывает новую эру в производстве сварных труб.

Новый стан по технологии Cage Forming полностью автоматизирован. Единая компактная система управления положением валкового инструмента состоит из 11-ти последовательных формовочных клетей: 8 из которых представляют собой систему калибров открытого типа, а 3 – закрытая группа клетей, для получения окончательного смыкания краев трубы. Всего же система формовочного инструмента представлена 83 независимыми валками, приводимых в движение от сервомоторов с компьютеризированным управлением, которые быстро и легко приводят систему в оптимальное положение для осуществления формирования трубы (рис.4).

Использование системы автоматизации для позиционирования валкового инструмента отличает станы, предназначенные для серийного производства труб, от станов «классической» конструкции, предназначенные для массового производства.



Рис. 4. Формовочный стан 100-170 Olimpia'80

Рассмотрим систему калибровки валкового инструмента клетей закрытого типа. Геометрия рабочего инструмента этих клетей, очень проста – цилиндры, положение которых изменяется в зависимости от диаметра изготавливаемой трубной заготовки (рис.5).

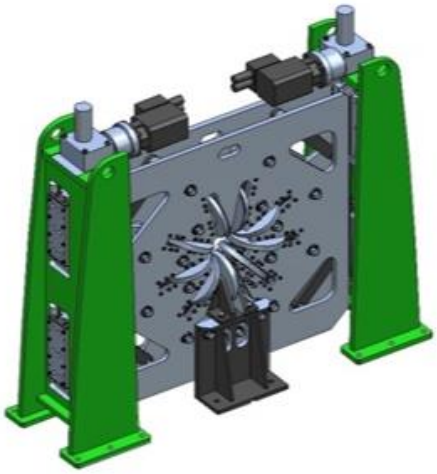


Рис. 5. Система валкового инструмента клети закрытого типа Olimpia'80

Наибольший же интерес представляет калибровка остальной валковой системы, в зоне действия которой происходит наиболее важная часть процесса формообразования. При детальном рассмотрении работы оборудования очевидно, что универсальная формовка состоит из последовательности операции гиба, образованной очередностью калибров, представленных на рисунке 6.

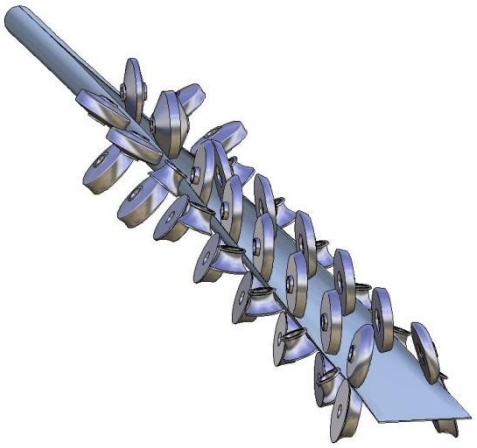


Рис. 6. Система валкого инструмента в клетях открытого типа Olimpia'80

Процесс формообразования состоит из последовательности гибки полосовой стали начиная с кромок. При этом геометрия рабочего инструмента рассчитана таким образом, чтобы при определенном расположении получать тот радиус и угол загибки, который позволяет получать допустимые деформации для качественной продукции (рис.7).

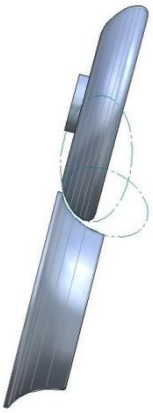


Рис. 7. Калибровка рабочей пары валков

Японская компания NAKATA впервые показала технологию FFX осенью 1999 года во Франции. С тех пор развитие направления гибкой формовки постоянно развивалось и на сегодняшний день технология FFX позволяет производить трубную заготовку методом непрерывной валковой формовки диаметром 609 мм и толщиной стенки до 22 мм.

Современный стан гибкой формовки (технологии Cage Forming) представляет из себя комплекс формовочного оборудования, состоящий из сочетания направляющих, заправляющих, обжимных, кластерных клетей, а также клеть обратного загиба [6]. Перечисленный состав оборудования представляет собой часть формовочного стана, который соответствует только открытой группе клетей. Всего же на данном участке расположены 11 клетей. Длина участка составляет более 21 метра.



Рис. 8. Формовочный стан FFX фирмы NAKATA

Для производства труб широкого сортамента независимо от размеров и свойств материала в технологии FFX используется специальный калибр, который включает в себе все типы кривизны наружней поверхности трубной заготовки в данном сортаменте. Поэтому полосовой металл можно формовать с любой кривизной (рис.9) [6].

В данном случае применяется метод охватывающей гибки: нижние и центральные валки используются для того, чтобы заставить избранный участок полосы охватывать верхний валок со сложным калибром, который может поворачиваться так, чтобы мог выбираться нужный участок его поверхности для контакта с полосой. В результате исключается избыточная деформация, что позволяет формовать тонкостенные трубы при меньших напряжениях [5].

Механизм поддержки валков в формовочных клетях (рис.10) имеет такую конструкцию, которая позволяет иметь свободу позиционирования валков как по вертикали, так и углу. Благодаря этому механизму трубы различных диаметров можно формовать простым изменением положения одного и того же комплекта валкового инструмента.

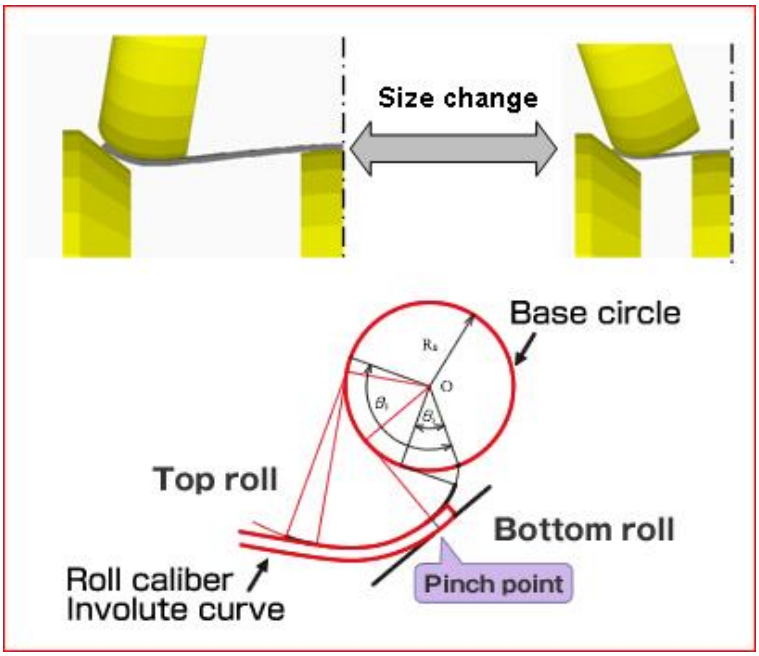


Рис. 9. Общее использование валков с стане FFX

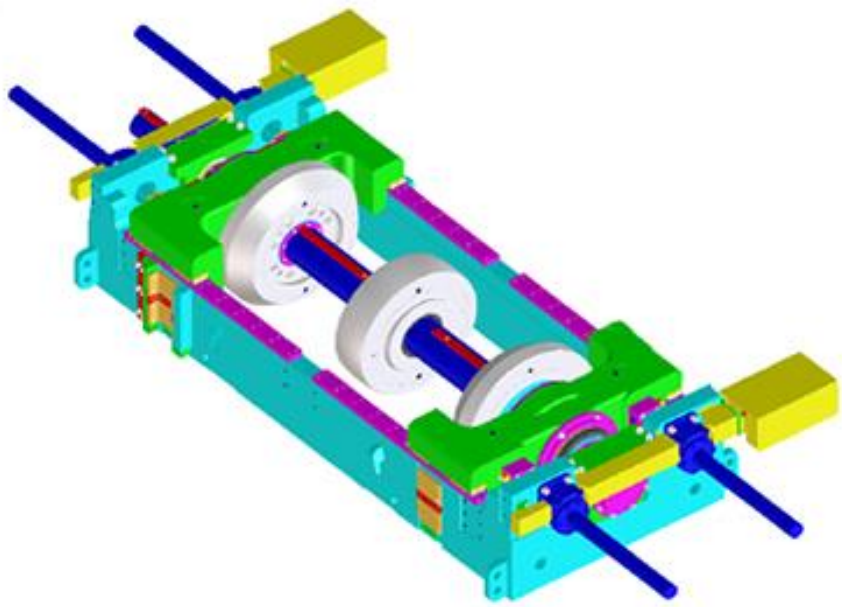


Рис. 10. Механизм поддержки валков в формовочном стане FFX

Трубосварочные комплексы SMS Meer имеют целый ряд уникальных особенностей в области настройки оборудования, способствующих постоянному увеличению выхода годной продукции и повышению качества. Сюда относятся крайне жесткие клети URD® для точного производства труб, система быстрой автоматической установки валков CSS-Quicksetting®, обеспечивающая максимально возможно быстрый переход на производство труб других размеров, и система быстрой перевалки валков, обеспечивающая сокращение вспомогательного времени и времени переоснастки. оборудование гибкой формовки компании SMS Meer отличается от всех другим конструктивным решением отсутствием так таковых формовочных клетей.

В оборудование линейной формовки трубная заготовка поступает предварительно сформированной. После чего полоса постепенно сворачивается в цилиндр. Это осуществляется двумя роликовыми направляющими, которые попарно согласованы напротив друг друга. Положение валкого инструмента может изменяться как по горизонтали, так и по вертикали с возможностью поворота в радиальном направлении. Процесс формовки трубной заготовки осуществляется также и нижними валками, положение которых меняется по вертикали.

При высоком значении отношения диаметра к толщине стенки формуемой трубной заготовки стабильность технологического процесса достигается путем ввода в очаг деформации дополнительного валкого инструмента. Смена комплекса валкового инструмента осуществляется благодаря системе быстрой замены кассеты - Quicksetting, предназначенной для автоматического позиционирования валков в пространстве оборудования линейной формовки.

Процесс сворачивания трубной заготовки происходит непрерывной на протяжении всей длины очага деформации с помощью роликов. Форма геометрии данного валкового инструмента простая и представляем из себя цилиндр, положение которого может изменяться в пространстве (рис.11).

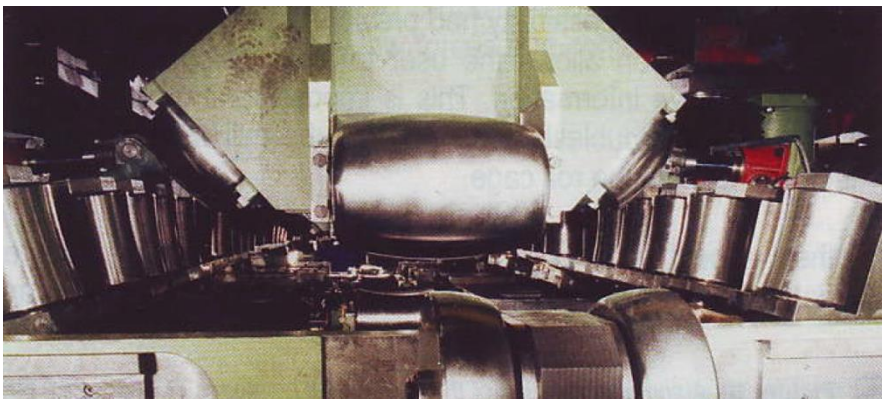


Рис. 11. Оборудование гибкой формовки SMS Meer

Однако формовочные станы компании SMS Meer по технологии Cage Forming выделяются наличием в составе оборудования классических клетей, конструкция который претерпела некоторые изменения - жесткие клети URD (рис. 12).

Конструкция этих клетей представляет из себя – закрытую раму из пластины вместо стержневой, что позволяет равномерно распределять силы прокатки как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении. Для сравнения, обычные классические клети воспринимают силы прокатки в основном только в вертикальном направлении, благодаря своей конструкции. Клети повышенной жесткости URD являются идеальными для точного изготовления круглых труб и полых профилей из марок сталей повышенного класса прочности.

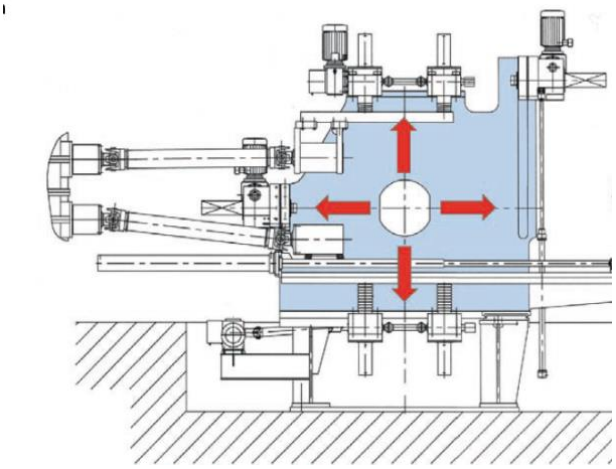


Рис. 12. Конструкция жесткой клети URD

В результате анализа конструкций существующих формовочных станов можно сделать вывод о том, что при создании современного оборудования обеспечение устойчивого процесса формовки в основном достигается разработкой нового рабочего инструмента. Конструкции же формовочных клетей, а также конструкции узлов осей валков, не претерпевают каких-либо серьезных изменений. Однако способность воспринимать нагрузку в процессе формообразования и влиять на устойчивость процесса во многом зависит именно от конструкции узлов и клетей. [2]

В первую очередь это касается трубоэлектросварочных станов для производства труб среднего и большого диаметра, где это влияние особенно заметно.

В данной работе с помощью системы параметрического проектирования Autodesk Inventor Professional 2014 разработаны физические модели и проведен анализ нагружения валковых систем клетей различных типов. Моделировались узлы валков клетей, предназначенных для производства нефтегазопроводных труб, с наружным диаметром 273 мм, толщиной стенки 7мм.

Рассмотрим вначале нагружение клети с открытым типом калибра.

В данном случае нагрузку при формовке воспринимают оси, на которых расположены рабочие валки.

Расчет проводился в несколько этапов: первый - анализ нагружения только осей клети, на которые устанавливают рабочий инструмент (рис.13).

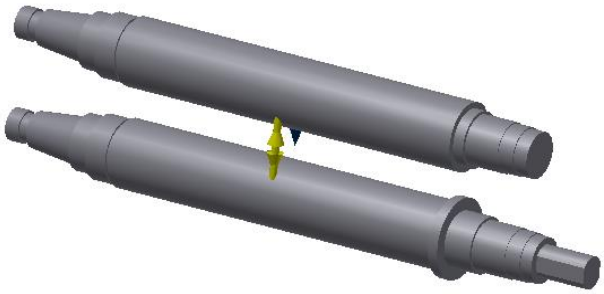


Рис. 13. Схема нагружения осей валков клети с открытым типом калибра

Оси валков нагружаем силой, равной 200 кН. Расчет проводился по методике М.Ю. Матвеева. Силу, действующей на данную систему, прикладываем таким образом: длина действия по оси валов равна 900 мм (средняя расчетная величина длины контактов валков с осями по длине).

Анализ производился с помощью Autodesk Inventor Professional 2014, который включает в себя модуль по анализу напряжений. Так же было сделано допущение, что нагрузку можно считать статической, так как процесс формообразования ленты непрерывный (при непрерывном процессе нагрузки практически не изменяются в продолжительный период времени).

Исходя из результата анализа, изображенного на рисунке 14, максимальное смещение – 0,18 мм, то есть смещения, возникающие в одной формовочной клети достигают 0,18 мм, что соизмеримо с величиной допусков. Не следует также забывать, что формовочный стан состоит из нескольких клетей, в каждой из которых может возникнуть смещение, суммарное воздействие которых на процесс формовки трудно предсказать, что может повлиять на процесс равномерности очага деформации трубной заготовки. Таким образом, деформация осей валков нарушает устойчивость процесса формообразования трубной заготовки, что приводит к изменению калибра и получению брака по форме, что в конечном итоге отражается на качестве сварной кромки в сварочной клети трубоэлектросварочного агрегата.

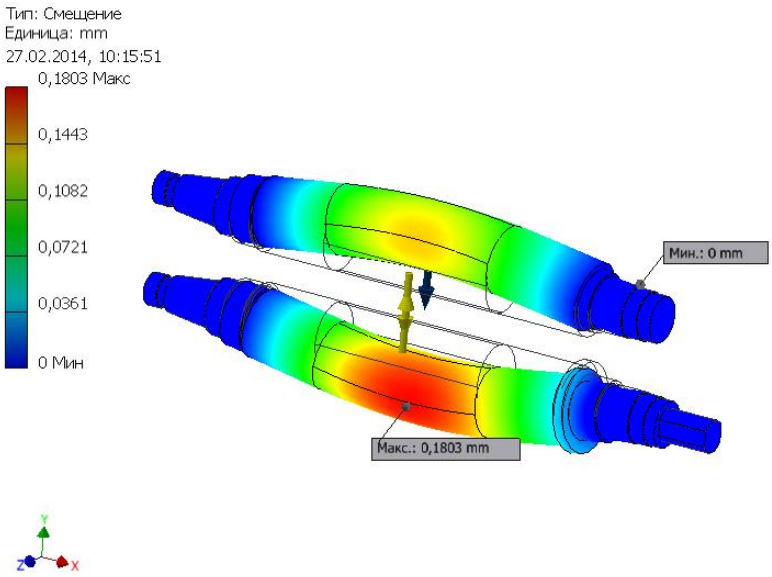


Рис. 14. Смещения в осях валков клети с открытым типом калибра

Расчеты показывают, что в рассматриваемых клетях целесообразно использовать укороченные оси, которые позволят обеспечить минимальный прогиб.

Однако анализ одних осей не дает полного пояснения влияния конструкции на качество получаемой продукции, поэтому на втором этапе проведен анализ нагружения осей вместе с калиброванными валками. В данном случае учитывалась масса рабочего инструмента.

При анализе осей вместе с валками при тех же условиях, что и в предыдущем случае, получаем уточненную картину смещений (рис.15). В данном случае нагрузка (200кН) приложена на участке, на котором происходит формовка трубной заготовки.

Суммарное смещение, полученное в результате расчета, будет составлять около 0,24 мм, что также сопоставимо с величиной допусков на размеры готовой трубы (±0,5 мм).

На третьем этапе расчетов было решено учесть фактическое положение полосы в калибре при формовке труб. Дело в том, что трубоэлектросварочные агрегаты предназначены для производства изделий широкого сортамента. Рассматриваемый комплекс оборудования имеет возможность производить трубы в пределах от 203 до 530 мм по диаметру с толщиной стенки от 2 до 10 мм. Для выпуска продукции каждого типоразмера производят комплект валков, каждый из которых имеет свои геометрические характеристики, в зависимости от положения в формовочном стане. При этом нагрузка, прикладываемая в процессе деформирования полосы, будет различной. Также будут различными напряжения и смещения в рассматриваемой системе.

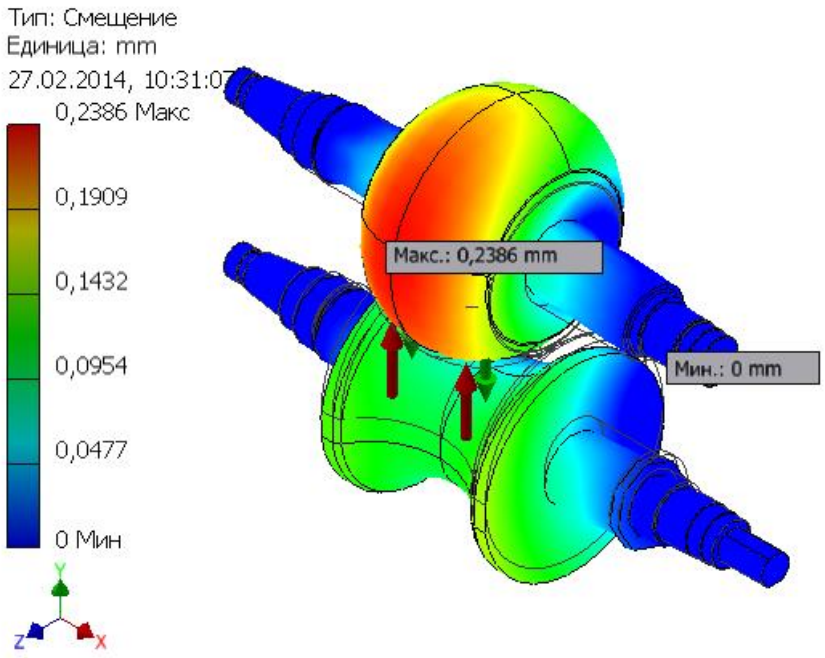


Рис. 15. Смещения в валковой системе клети с открытым типом калибра

В работе [7], посвященной моделированию процесса формовки сварных труб показано, что, рассматривая формовочный стан в целом, необходимо учитывать смещения, возникающие в валковой системе каждой из клетей, на процесс формовки в других клетях. Из расчетов видно, что точка приложения сил при формовке будет смещена по оси z в направлении, противоположном движению полосы, следовательно, смещение последней возможно не только вдоль направления приложения нагрузки. Действительно, произойдет смещение валков как по оси z (рис.16), так и по осям x (рис.17) и y (рис.18).

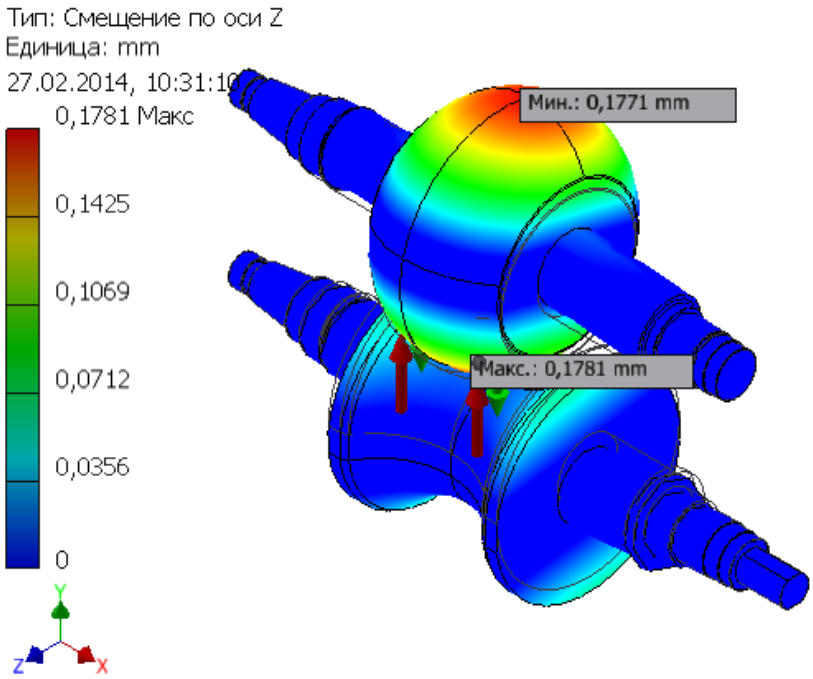


Рис. 16. Смещения вдоль оси z в валковой системе клети с открытым типом калибра

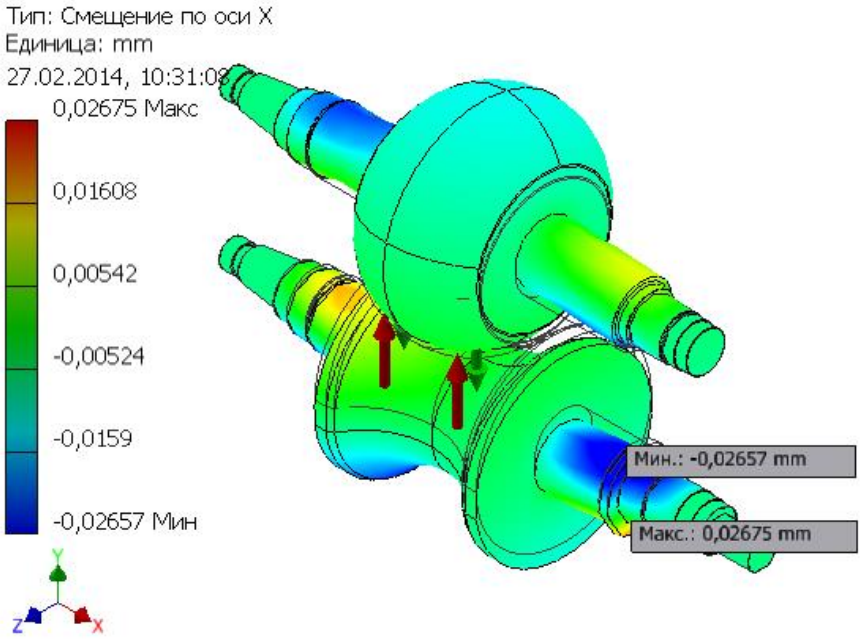


Рис. 17. Смещения вдоль оси x в валковой системе клети с открытым типом калибра

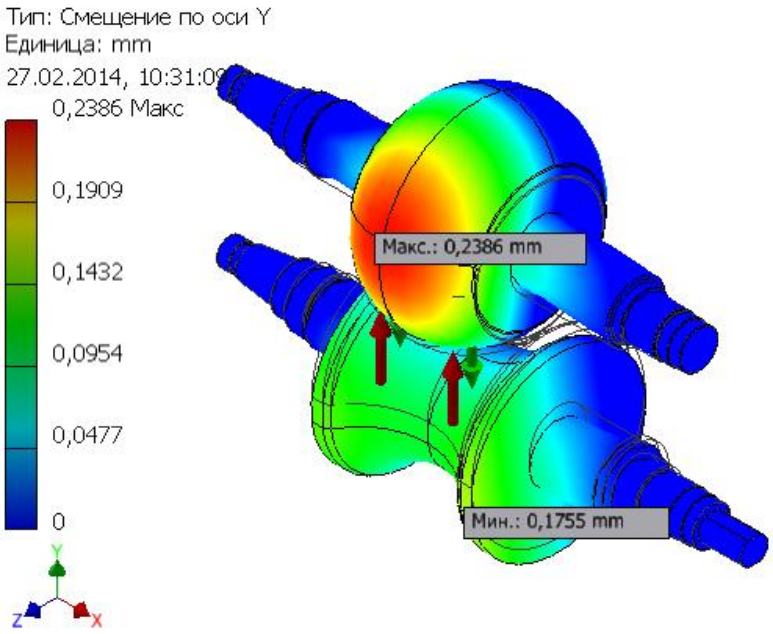


Рис. 18. Смещения вдоль оси у в валковой системе клети с открытым типом калибра

Таким образом, деформация валковой системы в предыдущей клети приводит к нарушению контакта полосы с валками, образующим калибр, в последующей. Это видно из модели очага формовки на рисунке 19.

Рассмотрим теперь нагружение клети гибкой формовки.

В результате расчета получены следующие данные по смещениям (рис. 20,21,22,23).

В клети гибкой формовки прогиб валковой системы больше, но в конструкция данного типа есть возможность компенсировать смещения регулировками валкового инструмента.

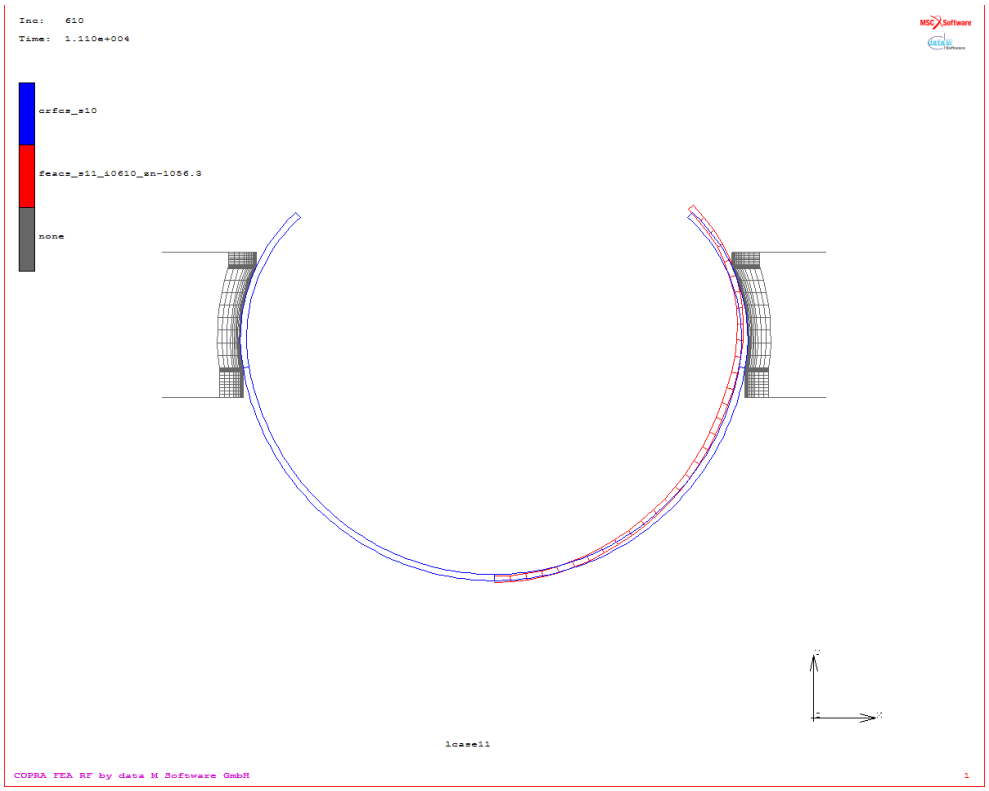


Рис. 19. Нарушение контакта полосы с формовочными валками

Проведенный анализ рассмотрен только для одной формовочной клети. Смещения будут возникать во всех клетях формовочного оборудования. В результате не будет создан монотонный очаг деформации (что является одним из критериев устойчивого процесса формовки). В результате из-за низкой точности формовки не будет достигнуто требуемое качество производимых труб.

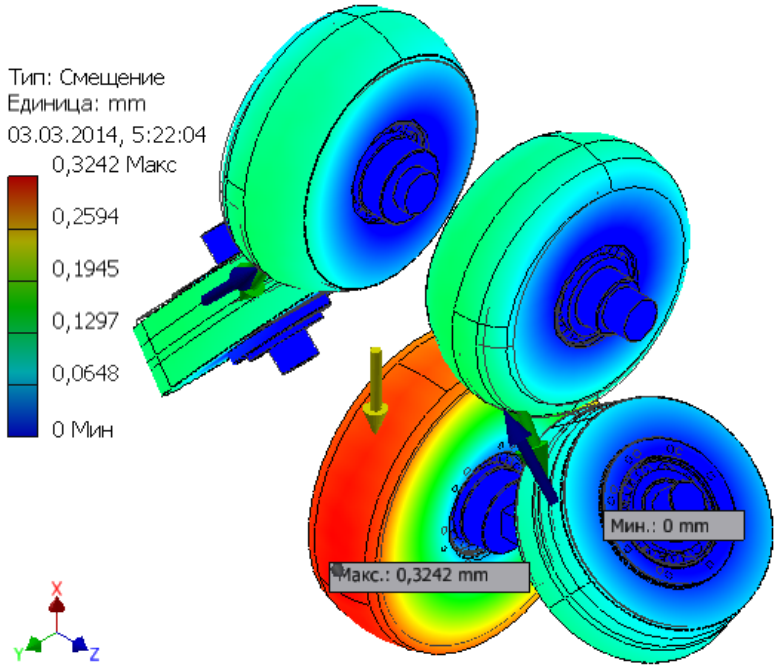


Рис. 20. Смещения в валковой системе клети гибкой формовки труб

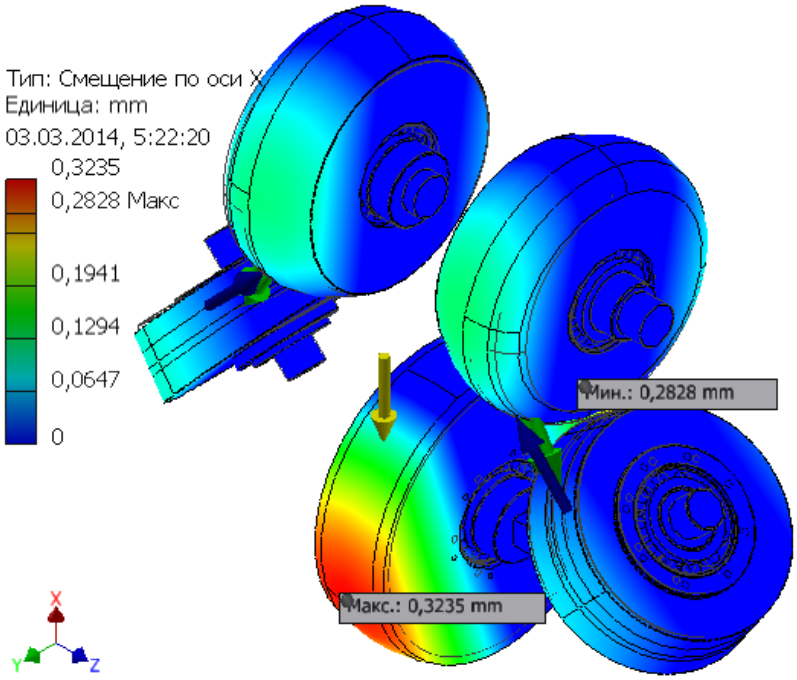


Рис. 21. Смещение вдоль оси x в валковой системе клети гибкой формовки труб

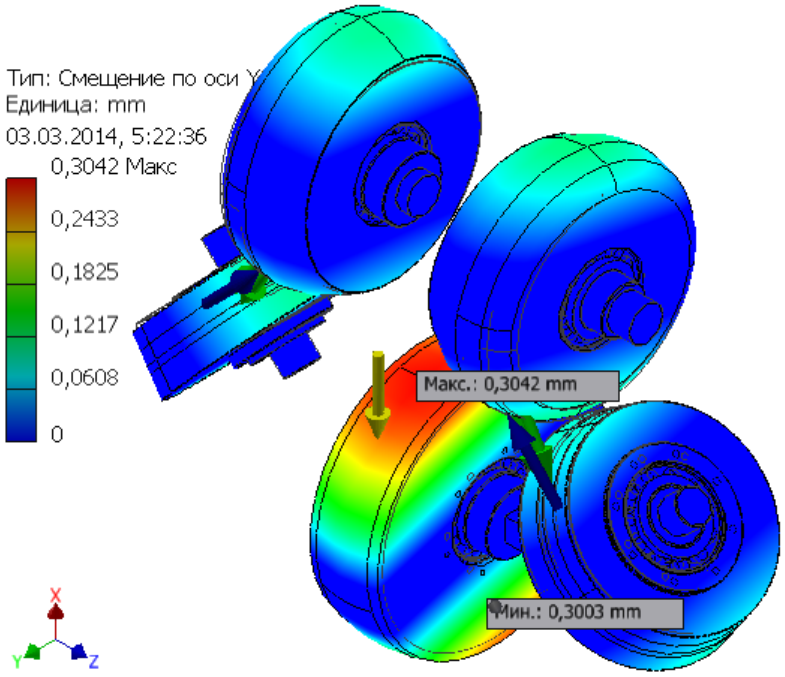


Рис. 22. Смещение вдоль оси y в валковой системе клети гибкой формовки труб

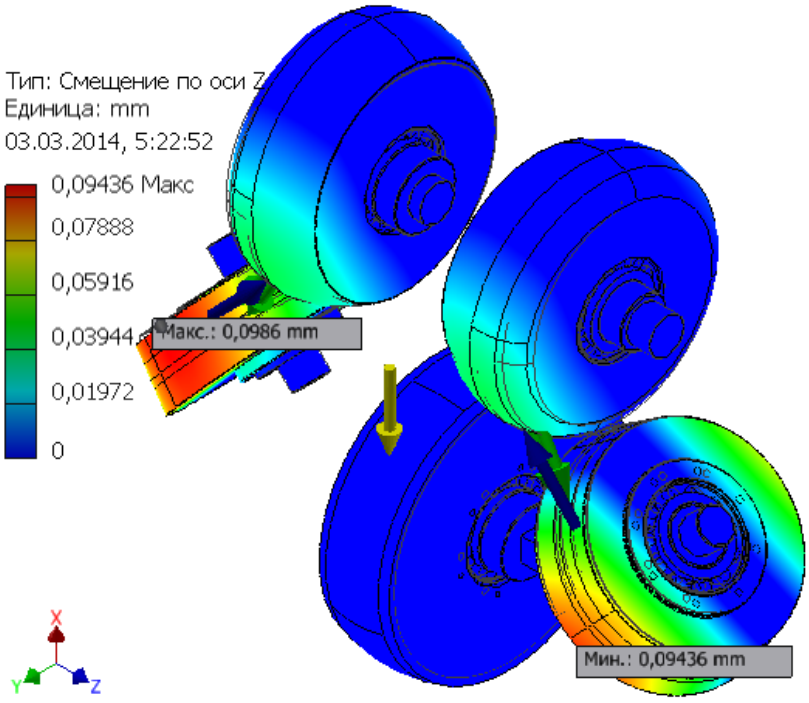


Рис. 23. Смещение вдоль оси z в валковой системе клети гибкой формовки труб

Для создания устойчивого процесса формовки, нужно на этапе создания нового оборудования учитывать смещения, возникающие в валковых системах. При создании нового оборудования использовать укороченные оси валковых систем, которые будут обеспечивать минимальный прогиб узла валка, при разработке калибров учитывать их перемещение от деформирующих сил при формовке.

Литература

1. Иконников Д.А. Реконструкция стана для прямошовной валковой формовки. [Электронный ресурс] // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Студенческая весна 2013: Машиностроительные технологии». – М.: МГТУ им. Н.Э Баумана. – № гос. регистрации 0321300796. – URL:studvesna.qform3d.ru?go=articles&id=855 (дата обращения: 17.12.2013). – Загл. с экрана.
2. Соколова О.В., Лепестов А.Е., Формообразовние трубных профилей. Электронное научно-техническое издание «Наука и образование» №7, июль 2010.
3. Соколова О.В., Лепестов А.Е., Прогнозирование качества прямошовных сварных труб. Электронное научно-техническое издание «Наука и образование» №6, июнь 2011.
4. Ю.М.Матвеев, Теоретические основы производства сварных труб, Москва «Металлургия» 1967 г., - 170 с.
5. Okamoto Atsumu, Wang Feizhou Method for roll forming steel pipes, and equipment for same. // United States Patent 6212925. - 2001.
6. Руководство по технической эксплуатации стана предварительной формовки FFX Nakata.
7. Лепестов А.Е., Скрипкин А.Ю., Моделирование процесса валковой формовки сварных труб и его практическое применение, г. Выкса, Пятая научно-практическая конференция молодых специалистов ОМК, тезисы докладов, 10-12 октября 2012г.

УДК 678.057.9

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СЭДВИЧ - ПАНЕЛЕЙ

Денис Александрович Емельянов,
Студент 6 курса,
кафедра «Машиностроительные технологии»,
Московский государственный университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: И.Е. Семенов,
доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроительные технологии»

За последние годы особо актуальным стало строительство быстровозводимых сооружений из легких металлических конструкций. К зданиям такого типа относятся здания торговых центров, супермаркетов, парковок, складских помещений, здания автосалонов и. т. д.

Проблема реконструкции и утепления уже построенных сооружений стоит не менее остро, чем возведение новых домов по современным теплосберегающим технологиям. Одним из удачных и недорогих примеров решения этой проблемы являются применение новых строительных материалов: гнутые профили из тонкостенного металла, такие как профнастил, металлочерепица, а также сэндвич – панели рис. 1.

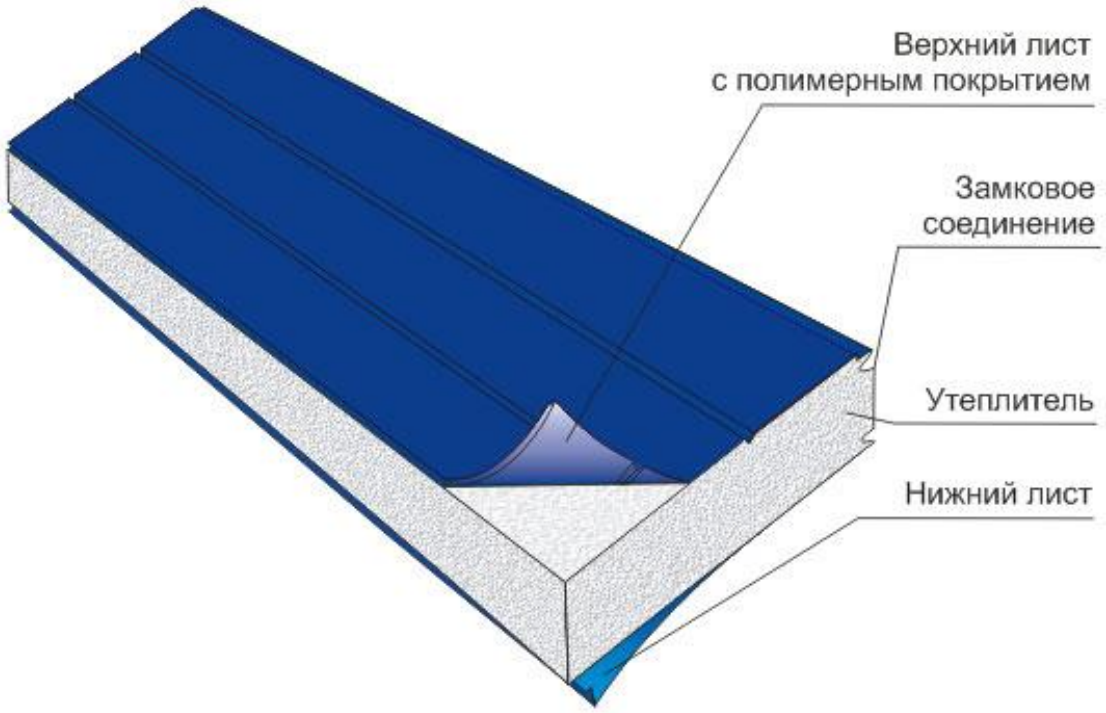


Рис.1 Трехслойная сэндвич – панель

Сэндвич – панель представляет собой трехслойную конструкцию из двух профилированных металлических листов и находящегося между ними утеплителя. Обычно сэндвич панели изготавливают из оцинкованной стали с полимерным покрытием. Листы профилируют для предания металлу жесткости, а также для формирования замкового соединения. В качестве утеплителя панели используют минеральную вату, пенополистирол, а также пенополиуретан. Специальным клеем на основе полиуретана верхний и нижний лист надежно и прочно соединяется утеплителем.

К достоинствам сэндвич – панелей относятся надежная теплоизоляция и звукоизоляция, сравнительно малый вес панели, простота и высокая скорость монтажа. Большой срок службы панелей прежде всего определяется стойкостью лакокрасочного покрытия к солнечному излучению, автомобильным выхлопам и другим загрязнениям гарантируют прекрасный внешний вид на длительное время.

Оборудование для производства сэндвич - панелей должно гарантировать максимальную надежность и одновременно быть достаточно простым в эксплуатации, а также в обслуживании для заказчиков. В процессе его создания уделяется большое внимание наладке и испытанию перед поставкой заказчику.

Для отладки особенностей производства панелей разработана специальная технологическая линия.

Линия по производству сэндвич – панелей является линией стендового типа. Она предназначена для производства трехслойных сэндвич панелей с наполнителем из минеральной ваты, или пенополистерола длиной от 2000 мм до 9000 мм, шириной от 600 до 1200 мм и толщиной по утеплителю от 50 до 250 мм. Толщина листа с лакокрасочным покрытием от 0,55 до 0,8 мм. Управление линией полуавтоматическое. Производительность до 950 кв.м/смену. Необходимая площадь для работы данной линии составляет 650 кв. м.

Схема и фото линии по производству сэндвич – панелей представлены на рис. 2 и 3.

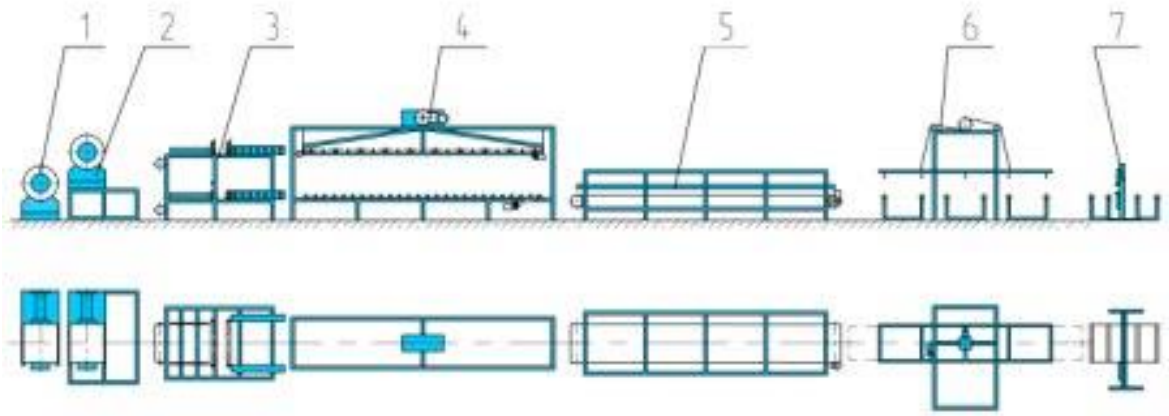


Рис. 2. Схема линии по производству сэндвич панелей

Линия состоит из приводных разматывателей нижнего 1 и верхнего 2, (расположенных соответственно на 1-ом и 2-ом этажах) на которых закреплены рулоны листовой стали. Рулонный металл с разматывателей задается в 2-х этажный профилегибочный стан 3, где на каждом этаже происходит профилирование обкладок будущей панели, нанесение клея и резка профилирование металла летучими ножницами на мерные длины. Ножницы расположены перед профилирующими роликами профилегибочного стана 3. После нанесения клея и резки, профилированный металл подается на стенд сборки панелей 4, где осуществляется непосредственная сборка панели. Сначала на нижний лист с нанесенным клеем рабочие специальным образом укладывают ламели минеральной выты, соблюдая направления волокон. Затем верхний лист с клеем переворачивают механизмом горизонтального поворота и укладывают поверх минеральной ваты, при этом обкладка удерживается вакуумными захватами. Необходимого взаимного расположения профилированных листов добиваются, прижимая листы панели к специальным линейкам. После сборки панель попадает в термогидропресс 5, где происходит склейка панели. Время склейки 6-7 минут. Затем готовая панель выдается на укладчик панелей 6. Для разрезки панелей на мерные длины в линии предусмотренная дисковая пила 7.



Рис. 3 Общий вид линии по производству сэндвич – панелей

Одним из главных недостатков данной линии является ее малая производительность т.к. линия стендового типа. В связи с этим встала задача для разработки автоматизированной линии позволяющей изготавливать продукцию по системе полного цикла с использованием конвейерного способа производства, которая смогла бы обеспечить более крупную производительность сэндвич – панелей.

Непрерывная линия для производства сэндвич – панелей предназначена для изготовления трехслойных сэндвич - панелей, непрерывным методом.

Данная линия способна производить панели длинной от 1000 до 15000 мм, шириной от 600 до 1200 мм и толщиной от 50 до 250 мм. Толщина стального листа с лакокрасочным покрытием варьируется 0,55 до 0,8 мм. Производительность линии до 2000 кв.м/смену, что в 2 раза больше по сравнению со стендовой линией производства сэндвич – панелей. Необходимая производственная площадь для размещения линии составляет 650 кв.м.

Схема и фото непрерывной линии для производства сэндвич – панелей представлены на рис. 4 и 5.

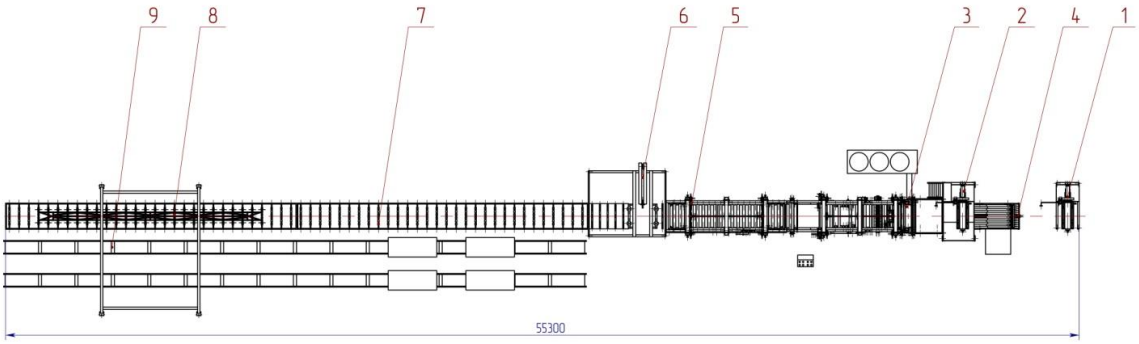


Рис 4. Схема непрерывной линии по производству сэндвич – панелей



Рис.4 Непрерывная линия для производства сэндвич – панелей

При производстве стеновых панелей, рулоны стали устанавливаются на разматыватели нижнего 1 и верхнего 2 этажей краном. Оператор заправляет рулонный материал управляя приводами узла профилирования 3. В линию задается минеральная вата с помощью толкателя ваты. 4. Толкатель ваты 4 управляется оператором вручную с автоматическим возвратом в исходную позицию во всех режимах работы линии. Оператор, управляя пневмоцилиндром, опускает прижимной ролик и включает фрезеровку ваты. Фрезеровка ваты необходима для получения ровных кромок минеральной ваты при заданной ширине панели.

Затем оператор настраивает ширину хода клеевой головки изменяя время включения пневмораспределителя. При выходе склеенного полотна сэндвич панели из пресса 5 оператор руководствуясь качеством склейки запускает цикл реза летучей пилы 6. После обрезки переднего конца начинается отсчет длины. Отрезанный конец вручную удаляется с линии. Затем линия запускается в автоматическом режиме.

После отсчета нужной длины происходит следующий цикл реза летучей пилы рис. 6.



Рис. 6 Пила летучая

По команде с датчика длины происходит захват панели пневмоцилиндрами переднего зажима и с небольшой задержкой пневмоцилиндрами заднего зажима. Включается привод поперечной подачи. При подходе к панели привод замедляется и врезается на требуемую глубину в панель и переходит на рабочую скорость. К концу цикла резки привод замедляется, дорезает панель и выходит из нее. Затем происходит раздвижение панелей в месте разреза пневмоцилиндрами, а пила на быстрой подаче возвращается в исходное положение. Отрезанная панель по рольгангу 7 перемещается в зону укладчика панелей 8. Оператор управляя укладчиком панелей 8 вручную укладывает панели на одну из тележек 9.

Литература

1. Пат. 2197354. Российская Федерация. МКП B21 D 22/10. Стан локальной формовки-гибки для изготовления изделий с рельефной поверхностью из листового мелалла/ Семенов И.Е.; опубл. 27.01.03. Бюл. №3.
2. Пат. 2246370. Российская Федерация. МКП B21 D 22/10, 5/14. 2005. Эластичный инструмент с регулируемой жесткостью для локальной формовки листового металла/ Семенов И.Е.; опубл. 20.02.05. Бюл. №5.
3. *Семенов И.Е. , Рыженко С.Н., Крутова М.В.* Моделирование процесса деформирования полосы эластичным и жестким рабочим инструментом // Сталь. 2007. №5, С.83-87.
4. *Семенов И.Е. , Рыженко С.Н., Поворов С.В.* Динамическое моделировании процесса локальной гибки-формовки для технологий производства покрытий для крыш. Заготовительные производства в машиностроении // 2007. №10. .40-43
5. *Семенов И.Е. , Рыженко С.Н., Поворов С.В.* Исследование напряженно-деформированного состояния эластичного рабочего инструмента и тонколистовой заготовки в процессе локальной гибки-формовки // Сборник трудов седьмой

конференции пользователей программного обеспечения CAD- FEM GmbH. –М.: Полигон-пресс,. 2007 С.350-354.
6. *Семенов И.Е. , Рыженко С.Н., Поворов С.В.* Моделирование процесса формовки на профилегибочном стане с эластичным рабочим инструментом // Вестник МГТУ. 2010. №4 (79). С. 86-93.
7. *Семенов И.Е. , Рыженко С.Н., Поворов С.В.* Моделирование процессов последовательной формовки продольных каналов в листе на стане с эластичным и жестким инструментом // Заготовительные производства в машиностроении. Кузнечно-щтамповочное производство. 2010, №6, С.29-32.

УДК 669.019.02/09

ОРГАНИЗАЦИЯ ТО И Р ЧИСТОВОЙ ГРУППЫ КЛЕТЕЙ АНРиПСиС (МЗ ЭЛЕКТРОСТАЛЬ)

Александр Геннадьевич Калужский,
студент 6 курса
кафедра «Оборудование и технологии прокатки»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.А. Мальцев,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технологии прокатки»

Рассматриваемый в статье объект — агрегат непрерывной разливки и прокатки стали и сплавов (АНРиПСиС), расположенный в сталеплавильном цехе №3 (СПЦ-3) металлургического завода «Электросталь» (ОАО МЗ «Электросталь»), конкретнее, его чистовая группа клетей (рис.1).



Рис 1. Чистовая группа клетей АНРиПСиС

После прокатки на планетарном стане 100 непрерывно-литая заготовка 60 × 80 мм значительно уменьшается в своем поперечном сечении и последовательно попадает в шесть клетей непрерывного стана «250», после чего она окончательно превращается в катанку Ø 8…10 мм или □ 8…10 мм.

Во время прохождения студентами производственной практики в СПЦ-3 обнаружено, что на предприятии все еще действует система планово-предупредительных ремонтов (ППР); это относится и к оборудованию АНРиПСиС.

Авторы считают, что необходим переход от системы ППР к новой системе ремонтов оборудования по фактическому состоянию, т.е. по результатам комплексного диагностирования исправности или неисправности деталей и узлов. Такой переход был задуман давно, до разработки федеральной программы «Техническое перевооружение и развитие металлургии России» (1993 — 2000 гг.).

Серьезный недостаток общепринятой системы ППР заключается в том, что план ремонтов прокатного стана составляется по среднестатистическим данным о выходе из строя его деталей и узлов. Ремонт по регламенту зачастую приводит к замене исправного оборудования и не исключает аварии между ремонтами.

Подход, альтернативный системе ППР, хотя и требует денежных затрат на приобретение дорогостоящей диагностической аппаратуры, все-таки себя оправдывает, поскольку эксплуатационные затраты на техническое обслуживание и ремонт не диагностируемого оборудования могут составить более половины от стоимости покупки прокатного стана, а со встроенной системой диагностики такие затраты уменьшаются примерно в десять раз.

Большинство отечественных организаций и заводов предпочитают приобретать дорогую зарубежную диагностическую аппаратуру, хотя в России имеются как свои производители, так и теоретические разработки в области диагностики и прогнозирования.

При этом разработчики программного обеспечения любой, даже самой современной, системы диагностики, как правило, не берутся за решение таких теоретических задач, как прогнозирование остаточного ресурса работы деталей и узлов оборудования прокатного стана. Результат промышленного диагностирования заключается лишь в констатации факта исправности или неисправности отдельных деталей и узлов в текущий момент времени, но никак не в прогнозировании даты их поломки.

Согласно ГОСТ Р 53564-2009 «Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Требования к системам мониторинга» термин «станция пользователя» определяет «программно-аппаратный комплекс на базе компьютеров общего применения, предназначенный для получения, отображения и протоколирования информации о состоянии оборудования в реальном масштабе времени».

Главным звеном предлагаемой авторами диагностической аппаратуры, доводящей ее до уровня станции пользователя, является персональный компьютер (ПК) с установленным на нем программным обеспечением (ПО), которое объединяет в себе программу оцифровки сигналов, поступающих с датчиков, и программу прогнозирования остаточного ресурса.

С целью превращения ПК в цифровой осциллограф для компьютерной обработки сигналов с датчиков, необходимо приобрести аналого-цифровой преобразователь (АЦП), который выполняет операции, связанные с преобразованием аналогового сигнала (напряжения) в цифровую форму (двоичный код); причем выполняемыми операциями являются дискретизация, квантование и кодирование. Оцифровка сигналов позволяет исключить такие недостатки аналогового способа формирования сигналов, как низкие стабильность и линейность, нарушение квадратуры, трудность фильтрации.

Отечественные и зарубежные фирмы, такие как L-Card, выпускают внешние и внутренние АЦП с различными техническими характеристиками. Эти устройства снабжаются программным обеспечением, которое позволяет превратить компьютер в электронный осциллограф.

Авторами выявлен недостаток всех существующих как стационарных, так и портативных систем диагностики и мониторинга ТС — неспособность предотвращать внезапные аварии металлургического оборудования, вызванные усталостным разрушением его высоконагруженных деталей [1, 2].

Надежность деталей прокатного стана характеризуется прочностью, жесткостью, точностью, износостойкостью, теплостойкостью и другими критериями [3]. Так, расчет надежности, например, опасного сечения вала шпинделя по критерию прочности основан на сравнении расчетного значения максимального касательного напряжения $\tau_{шп}$, с допускаемым касательным напряжением материала шпинделя $[\tau]$. Последнее выбирается по нормативным, справочным или эксплуатационным данным.

Для обеспечения требуемой работоспособности сечения вала правильно задают коэффициент безопасности, равный $\tau_{шп}/[\tau]$. При этом расчетные параметры часто рассматривают как детерминированные величины, хотя в действительности они имеют рассеяние. Надежность сечения вала оценивают по критерию прочности, если его расчетное значение $\tau_{шп}$ меньше предельного $[\tau]$.

Область перекрытия плотностей распределений случайных величин $f(\tau_{шп})$ и $f([\tau])$ на интервале от математического ожидания случайной величины $\bar{\tau}_{шп}$ до математического ожидания случайной величины $[\bar{\tau}]$ заштрихована (рис.2).

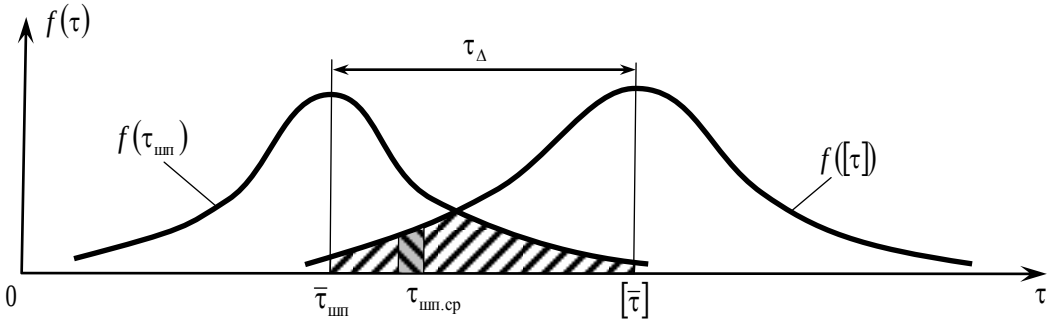


Рис.2. Графики плотностей распределения случайных величин

Вероятность безотказной работы шпинделя можно записать в виде

$$P(t)=P([\tau]\geq\tau_{шп})=P([\tau]-\tau_{шп})\geq 0.$$

Выделяя в области перекрытия плотностей распределений небольшой интервал и записывая вероятность попадания величины $\tau_{шп}$ в данный интервал, а также вероятность того, что $[\tau]$ превышает среднее значение $\tau_{шп.ср}$, задаваемое этим интервалом, можно получить выражение для вероятности безотказной работы

$$P([\tau]\geq\tau_{шп})=\int_{-\infty}^{\infty} f(\tau_{шп})\left[\int_{\tau_{шп.ср}}^{\tau_{шп}} f([\tau])\,d[\tau]\right]d\tau_{шп}$$

Используя это выражение, можно вычислить вероятность безотказной работы шпинделя при различных сочетаниях законов распределения расчетного $\tau_{шп}$ и предельного $[\tau]$ значений критерия прочности.

Вводя случайную величину $\tau_{\Delta} = [\bar{\tau}] - \bar{\tau}_{шп}$, можно определить вероятность безотказной работы

$$P(t) = P(\tau_{\Delta} \geq 0).$$

Допустим, что $[\tau]$ и $\tau_{шп}$ — независимые неотрицательные случайные величины. Тогда плотность распределения случайной величины $\tau_{\Delta} \geq 0$ имеет вид

$$f(\tau_{\Delta}) = \int_0^{\infty} f(\tau_{\Delta} + \tau_{шп}) f(\tau_{шп}) d\tau_{шп}.$$

Следовательно, вероятность безотказной работы объекта при различных сочетаниях законов распределения $[\tau]$ и $\tau_{шп}$ можно определить согласно зависимости:

$$P(t) = \int_0^{\infty} f(\tau_{\Delta}) d\tau_{\Delta} = \int_0^{\infty}\int_0^{\infty} f(\tau_{\Delta} + \tau_{шп}) d\tau_{шп} d\tau_{\Delta}.$$

При постепенных отказах, таких как износ, функция изменения параметра $\tau_{шп}$ во времени непрерывна. Отказ произойдет тогда, когда параметр $X_{р}$ достигнет предельного значения $X_{п}$ (максимального — при возрастании, минимального — при уменьшении $X_{р}$). Скорость процесса $\gamma(x)$ изменения параметра $X_{р}$ как случайного процесса зависит от сочетания влияющих на нее факторов. Например, скорость изнашивания бронзового вкладыша при прочих равных условиях будет больше в том шарнире, в котором больше давление на контакте и скорость скольжения, но хуже условия смазки. Распределение скоростей $\gamma(x)$ протекания процесса характеризуется кривой плотности вероятности $f(\gamma)$. На графике, иллюстрирующем линейную зависимость $X_{р}(t)$, например абразивное изнашивание $U = \gamma_{ср}(t)$, видно, что центр группирования значений $X_{р}$ смещается от начального положения X_0 к предельному $X_{п}$ (рис.3). Математическое ожидание $m_{X_{р}}$ параметра $X_{р}$ увеличивается с течением времени: $m_{Xр} = X_{р_0} + \gamma_{ср} t$.

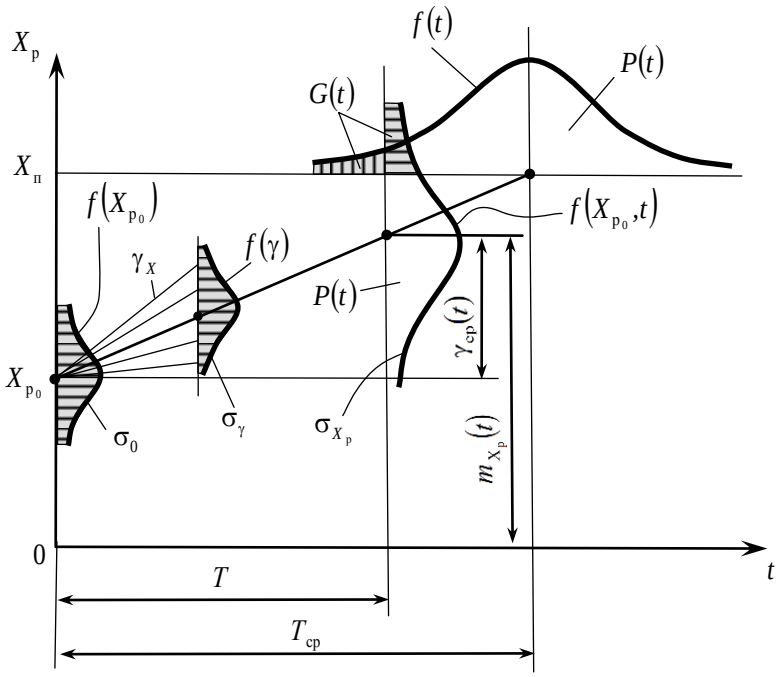


Рис. 3. Схема формирования постепенного отказа

Растет и рассеяние значений $X_р$ относительно центра группирования, характеризуемое средним квадратическим отклонением: $\sigma_{Xp} = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_\gamma^2 t^2}$.

Вместо кривой $f(X_{р_0})$ получаем кривую $f(X_р, t)$, выход которой за пределы $X_п$ означает отказ. Площадь, ограниченная кривой $f(X_р, t)$ и прямой $t = T$, равна единице. Та ее часть, которая выше прямой $X_р = X_п$, численно равна вероятности отказа $G(t = T)$. Другая часть площади, что ниже прямой $X_р = X_п$, представляет собой вероятность безотказной работы $P(t = T)$. По распределениям $f(X_р, t)$ можно построить график $f(t)$ распределения времени t работы объекта до отказа или до предельного состояния. Зная плотность вероятности $f(t)$, можно оценить вероятность безотказной работы $P(t)$ в любой момент времени $t = T$. Она численно равна площади под кривой $f(t)$, расположенной правее линии $t = T$,

$$T_{ср} = \int_0^\infty t\ f(t)dt .$$

В случае постепенных отказов обычно используют нормальное распределение, являющееся универсальным для практических расчетов.

Дифференциальная функция нормального распределения

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t - m_t)^2}{2\sigma_t^2}\right].$$

Нормальное распределение имеет два параметра: математическое ожидание m_t и среднее квадратичное отклонение σ_t (рис.4).

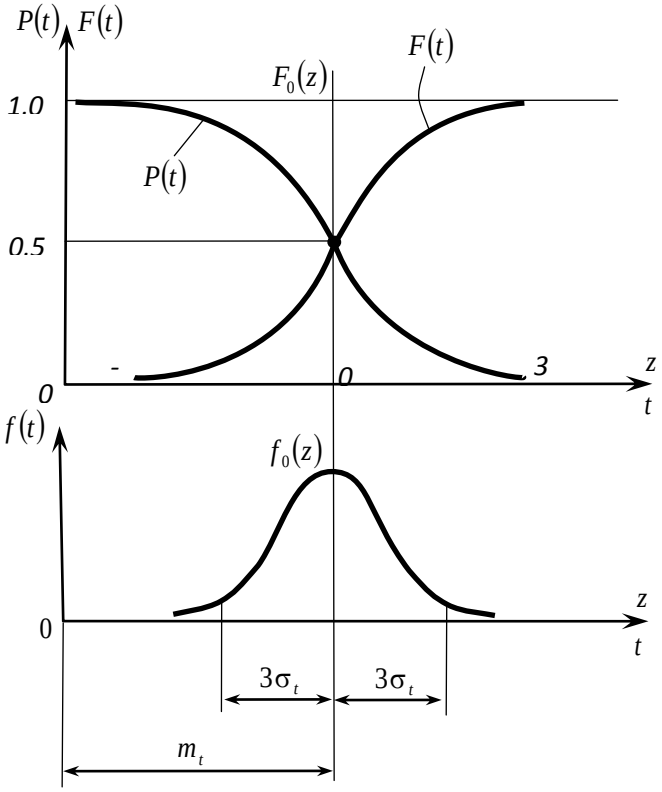


Рис.4. Нормальное распределение: *а* — вероятность безотказной работы $P(t)$ и интегральная функция распределения $F(t)$; *б* — плотность вероятности $f(t)$

Их значения оценивают по результатам N испытаний:

$$m_t \approx T_{\text{ср}} = \bar{t} = \frac{\Sigma t_i}{N};$$

$$\sigma_t \approx \sqrt{\left(\frac{1}{N-1}\right)\left(\sum t_i - \bar{t}\right)^2},$$

где $\bar{t}$ и σ_t — оценки математического ожидания и среднего квадратичного отклонения.

Интегральная функция распределения

$$F(t) = \int_{-\infty}^{t} f(t)dt$$

Вероятность отказа $G(t)$ и вероятность безотказной работы $P(t)$

$$G(t) = F(t) = \int_{-\infty}^{t} f(t)dt$$

$$P(t) = 1 - \int_{-\infty}^{t} f(t)dt = 1 - \int_{-\infty}^{t} \frac{1}{\sigma_t\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-m_t)^2}{2\sigma_t^2}\right].$$

Вычисление интегралов заменяют использованием таблиц для нормального распределения, но не как функции двух параметров $(t-m_t)$ и σ_t, поскольку в этом случае таблицы были бы громоздкими, а как функции одного параметра z:

$$z = \frac{t - m_t}{\sigma_t}.$$

Тогда функция плотности вероятности $f_0(z)$ будет иметь вид:

$$f_0(z) = f(t)\sigma_t = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2}.$$

Величина z является центрированной, так как $m_z = 0$, и нормированной, так как $\sigma_z = 1$. Функция плотности распределения записывается в относительных координатах с началом на оси симметрии петли.

Интегральная функция как интеграл от плотности вероятности описывается зависимостью

$$F_0(z) = \int_{-\infty}^{t} f_0(z)\,dz,$$

из которой следует, что $F_0(z) + F_0(-z) = 0$.

Плотность распределения $f(t)$, вероятность отказа $G(t)$ и безотказной работы $P(t)$ определяют согласно зависимостям

$$f(t) = f_0(z)/\sigma_t; \quad G(t) = F_0(z); \quad P(t) = 1 - F_0(t),$$

где значения $f_0(z)$ и $F_0(z)$ берут из таблиц.

Вместо интегральной функции распределения $F_0(z)$ иногда пользуются функцией Лапласа

$$\Phi(z) = \int_0^z f_0(z)dz = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-z^2/2} dz$$

и соответственно

$$F_0(z) = \int_{-\infty}^{t} f_0(z)dz + \int_0^t f_0(z)dz = 0{,}5 + \Phi(z).$$

Вероятность отказа $G(t)$ и безотказной работы $P(t)$ выражают через функцию Лапласа и записывают следующим образом:

$$G(t) = 0{,}5 + \Phi\left(\frac{t - m_t}{\sigma_t}\right); \quad P(t) = 0{,}5 - \Phi\left(\frac{t - m_t}{\sigma_t}\right).$$

Наряду с оценкой вероятности безотказной работы $P(t)$ за данную наработку нередко требуется решить обратную задачу — определить время или наработку, соответствующие заданной вероятности безотказной работы $P(t)$. Эту наработку (время) определяют с помощью квантилей нормированного нормального распределения $t = m_t + a\sigma_t$, значения которых даются в таблицах.

Литература

1. Колесников А.Г., Вафин Р.К., Мальцев А.А. Аппаратура для мониторинга остаточного ресурса прокатных станов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. №4. С.71 – 73.
2. Система мониторинга привода клети 400 сортопрокатного стана / Р.К. Вафин, Б.А. Серман, А.А. Мальцев и др. // Сталь. 2000. №12. С.28 – 29.
3. Яковлев Р.А. Расчет надежности соединений и передач прокатных станов. учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 60 с/

УДК 621.771

ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА ТОЛСТЫХ ЛИСТОВ И ПЛИТ С ПОВЫШЕННЫМИ ТРЕБОВАНИЯМИ К МЕХАНИЧЕСКИМ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМ СВОЙСТВАМ

Анна Алексеевна Солякова, Иван Игоревич Лубнин,
студенты 5 курса,
кафедра «Оборудование и технологии прокатки»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: П.Ю. Жихарев,
старший научный сотрудник ФГУП «ЦНИИ чермет им. И.П. Бардина»

Освоение арктического шельфа, северных и сейсмически активных регионов добычи углеводородов требует создания высоконадежных материалов для арктических конструкций морского шельфа (оффшорных платформ и труб) – хорошо свариваемых сталей повышенной прочности, хладостойкости с высоким сопротивлением хрупким и вязким разрушениям.

Пути получения уникального сочетания прочности, пластичности, вязкости, хладостойкости и трещиностойкости в сталях, предназначенных для производства газонефтепроводных труб для северных магистралей, были всесторонне изучены. На этой базе в ЦНИИчермет им. И.П.Бардина разработаны составы сталей и современные технологии выплавки, внепечной обработки, непрерывной разливки и термомеханической прокатки, позволившие производить трубный металл отличного качества категорий прочности до К65 (Х80) в толщинах до 27 мм.

На рисунке 1 показаны основные существующие и перспективные свойства листового проката для труб магистральных газо- и нефтепроводов.

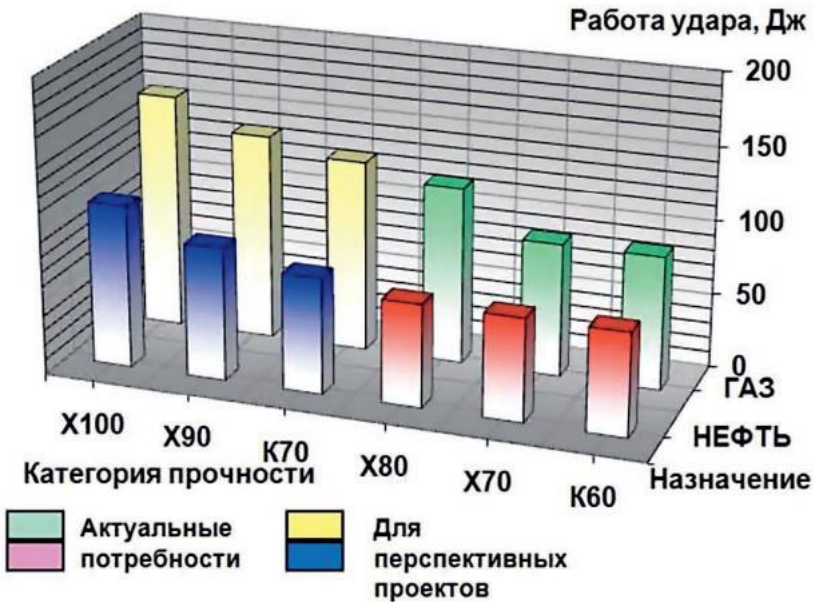


Рис.1 – Основные механические характеристики металла для магистральных трубопроводов [1]

Чем выше прочность, тем труднее обеспечить низкотемпературную вязкость и сопротивление разрушению, поэтому единственным механизмом, позволяющим двигаться

в данном направлении, является дальнейшее диспергирование микроструктуры. При этом основное измельчение структуры до получения целевого состояния дисперсности осуществляется на стадии термомеханической прокатки и, как показывают последние исследования ЦНИИчермет, очень важную роль в получении окончательной дисперсной структуры (игольчатого феррита, феррито-бейнитной, феррито-бейнитной-мартенситной и др.) играет структура рекристаллизованного и деформированного аустенита, дефекты которой наследуется и новой фазой в процессе □□□ превращения. Но еще сложнее получить высокопрочное и одновременно высоковязкое состояние в прокате больших толщин и одной из причин этого является недостаточная степень деформации.

На рисунке 2 показано влияние толщины проката на прочностные свойства (размер исходного сляба одинаков) переходную температуру хрупкости Т90 по испытаниям ИПГ (испытания падающим грузом). Видно, что помимо снижения прочности, увеличение толщины проката приводит к существенному ухудшению хладостойкости.

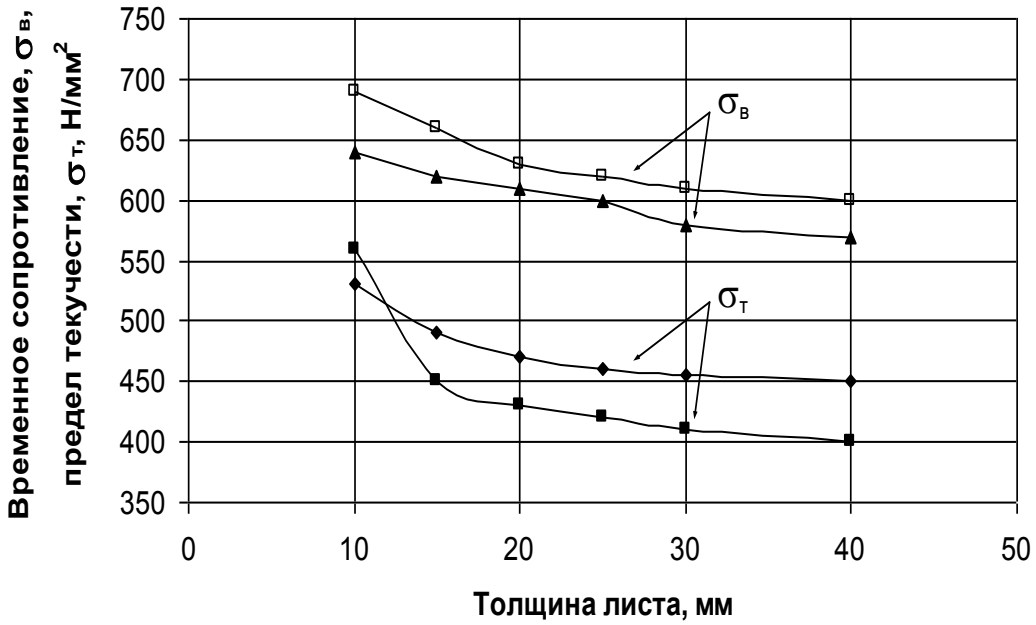


Рис. 2 – Влияние толщины листа на прочность проката

Уровень свойств материала определяется типом и параметрами структуры, которая формируется в результате процесса термопластического воздействия. Результатом последовательного диспергирования структуры является обеспечение уникальных свойств в малолегированной конструкционной стали.

Таким образом, проблема получения качественного толстолистового проката высокой (30-40мм) и сверхвысокой (100-200 мм) толщины диктует особый подход к процессу производства стали. Основным инструментом для получения требуемого структурного состояния в прокате больших толщин является интенсивная пластическая деформация металла на всех этапах деформационно-термической обработки. Это может быть проиллюстрировано следующими примерами.

Если ранее при производстве проката для труб толщиной до 22 мм считалась достаточной толщина сляба 250 мм, то при производстве проката толщиной до 40 мм для труб подводных газопроводов не всегда достаточной является толщина сляба 300 мм, поскольку для получения целевого структурного состояния проката, обеспечивающего необходимую трещиностойкость, перед чистовой прокаткой необходимо иметь 4-6 кратный подкат по отношению к толщине готового листа. При этом также нужно учитывать необходимость измельчения зерна аустенита в области рекристаллизации при черновой прокатке. Таким образом, отношение толщины непрерывнолитого сляба к

толщине листа для труб магистральных трубопроводов с повышенным уровнем требований стремиться к 9-10.

Еще сложнее обстоит дело с производством особо толстолистового проката (плит) для обустройства морского шельфа. При имеющемся слябе 300 мм и толщине готового проката 100-150мм это отношение составит 2-3 , что явно недостаточно для производства качественных плит.

Обеспечение требуемой кратности деформации при горячей прокатке толстых листов и плит ответственного назначения может быть достигнуто применением заготовок большей толщины (от 350 до 450 мм). В таблице 1 приведены результаты расчетов толщины сляба в зависимости от толщины листа, необходимой для обеспечения достаточной суммарной степени деформации в черновой и чистовой стадиях прокатки (ТМО) и надёжного обеспечения всего комплекса свойств штрипсов.

Таблица 1 – Рекомендуемое соотношение между толщиной сляба, толщиной подката и толщиной готового листа

Толщина листа, мм	Толщина металла перед чистовой стадией прокатки, мм	Минимально необходимая толщина сляба, мм
30	150	300
32	160	320
34	170	340
36	180	360
38	190	380
40	200	400
42	210	420

В то же время можно отметить, что повышение толщины непрерывнолитой заготовки позволяет существенно улучшить технико-экономические показатели текущего производства освоенной продукции.

К основным факторам улучшения указанных показателей следует отнести:

- повышение кратности раскатов (слябы большей толщины позволяют получить большее количество кратных листов в раскате), что существенно повышает часовую производительность стана;
- снижение расходных коэффициентов за счет уменьшения технологическойобрези.

Отсутствие в России производства толстых слябов в условиях необходимости решать стратегические задачи приведет к зависимости российских производителей от поставок по импорту, что резко снизит конкурентную способность отечественной промышленности.

В настоящее время в России есть мощные прокатные станы 5000, оснащенные установками ускоренного последеформационного охлаждения, необходимые для производства толстолистового проката для труб, эксплуатируемых в экстремальных условиях, однако нет ни одной МНЛЗ для производства слябов с толщиной свыше 355 мм. Согласно таблице 2 слябы с толщиной 300-355 мм производятся на следующих предприятиях: ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», ОАО «Нижнетагильский металлургический комбинат», Череповецкий металлургический комбинат ОАО «Северсталь», ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат». Обобщенные сведения об этих производствах приведены в таблице 3.

Таблица 2 – Максимальная толщина проката, которую можно произвести из слябов имеющихся толщин

Производитель слябов	Толщина слябов, мм	Максимально возможная толщина, мм	
		Штрипсов	Плит
ОАО «Северсталь»	315	32	80(60)
ОАО «ММК»	300	30	80(60)
ОАО «НЛМК»	355	34,5	90(70)
ОАО «НТМК»	300	30	80(60)
Предлагаемый размер	400	40	100(80)

Таблица 3 – Машины непрерывного литья заготовок для производства толстых слябов

Предприятие	№ МНЛЗ, цех	Тип МНЛЗ	Максимальная толщина слитка, мм	Изготовитель оборудования
ОАО «ММК»	МНЛЗ №6, ККЦ	Криволинейная с вертикальным участком, одноручьевая	300	SMS Demag
ОАО «НТМК»	МНЛЗ №4, ККЦ	Криволинейная с вертикальным участком, одноручьевая	300	VAI-Siemens
ОАО «Северсталь»	МНЛЗ №2, ККЦ	Криволинейная с вертикальным участком, двухручьевая	315	ОАО «Уралмаш»
ОАО «НЛМК»	МНЛЗ №8, ККЦ 2	Криволинейная с вертикальным участком, двухручьевая	355	VAI-Siemens

Выводы

1) Для обеспечения механических и эксплуатационных свойств металла для перспективных проектов необходимо дальнейшее диспергирование микроструктуры.

2) Исследованиями доказано, что получение структуры, обеспечивающей уникальные свойства, возможно при достаточно интенсивной пластической деформации, что требует отношения толщины конечного проката к толщине заготовки от 4 до 10 (в зависимости от назначения).

3) Указанное отношение при производстве толстолистовой продукции может быть достигнуто при использовании заготовок с толщиной 400 мм и выше. В РФ имеются мощные прокатные станы 5000, способные обрабатывать такую заготовку, но нет ни одной МНЛЗ, способной её отливать.

Литература

1. *Горынин И.В., Малышевский В.А., Хлусова Е.И.* Наноструктурированные конструкционные стали – прорывное направление металлопотребляющих отраслей промышленности // Журнал «Нанотехнологии, экология, производство», №2 (4), май 2010, С. 103-107.
2. EN10225:2008 Weldable structural steels for fixed offshore structures – Technical delivery conditions

УДК 621.771

АНАЛИЗ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ ТОЛСТЫХ ЛИСТОВ НА СТАНЕ 5000

Андрей Павлович Степанов,
студент 3 курса,
кафедра «Оборудование технологии прокатки»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Миронова М. О[(1)], Мунтин А. В. [(2)],
Ассистент кафедры «Оборудование технологии прокатки» [(1)], аспирант кафедры «Оборудование технологии прокатки» [(1)],

1. Введение

В настоящее время перед российской промышленностью стоит важнейшая цель – стать полноправной частью мировой экономики, при этом значение металлургии особенно высоко. На многих предприятиях стоит морально и физически устаревшее оборудование, которому требуется модернизация. Это требует больших финансовых затрат, высококвалифицированных кадров и времени. Одним из лидеров металлургической промышленности России является Объединенная Металлургическая Компания.

Объединенная металлургическая компания (ОМК) – один из крупнейших производителей труб, железнодорожных колес и другой металлопродукции для энергетических, транспортных и промышленных компаний. В состав ОМК входит 6 крупных предприятий металлургической отрасли.

Трубный комплекс ОМК включает в себя Выксунский металлургический завод (Нижегородская область), Альметьевский трубный завод (Республика Татарстан) и завод Трубодеталь (Челябинская область).

Выксунский металлургический завод (ВМЗ) – один из старейших центров металлургической промышленности России, основан в 1757 году. Предприятие производит стальные трубы диаметром 21,3-1422 мм и толщиной стенки до 50 мм. Трубы выпускаются с наружным двух- и трехслойным антикоррозионным полиэтиленовым или полипропиленовым покрытием, а также с внутренним гладкостным и антикоррозионным покрытием.

Альметьевский трубный завод (АТЗ) – производственное предприятие, основанное в 1966 году. Основные производственные линии позволяют выпускать трубы диаметром 10-219 мм с толщиной стенки от 1,5 до 8,0 мм.

Завод Трубодеталь - один из крупнейших в России и странах СНГ предприятие по производству соединительных деталей для трубопроводов из низколегированной стали диаметром 57- 1420 мм.

Производственные мощности ОМК по выпуску труб различного назначения составляют 3,2 млн. т труб в год. В настоящее время на предприятиях ОМК проводится глубокая реконструкция, в результате которой ожидается увеличение мощностей до 3,5 млн. т труб в год.

Металлургический комплекс ОМК включает в себя Чусовской металлургический завод и Щелковский металлургический завод (Московская область), ОМК-Сталь (Литейно-прокатный комплекс г. Выкса).

2. Развитие металлургического комплекса ОМК

Основной задачей компании в настоящий момент является достижение вертикальной интеграции процесса производства труб, т.е. обеспечить независимость данного процесса от сторонних поставщиков.

Технологию получения труб можно разделить на три основных этапа, которые связаны в жёсткую производственную цепочку:

- выплавка стали;
- прокатка;
- формовка труб.

Причём для производства труб среднего и большого диаметра существует своя отдельная цепочка. Соответственно для осуществления принципа вертикальной интеграции необходимо обеспечить все три звена для каждого из производств.

Для реализации проекта относительно труб среднего диаметра ОМК был построен и введён в эксплуатацию совершенно новый и в своём роде уникальный завод для производства рулонной стали – Литейно-прокатный комплекс недалеко от города Выкса. Включающий в себя машину непрерывного литья заготовки (МНЛЗ) и непрерывный шестиклетевой широкополосный стан (НШПС).

Литейно-прокатный комплекс позволил восполнить сразу два звена производственной цепочки:

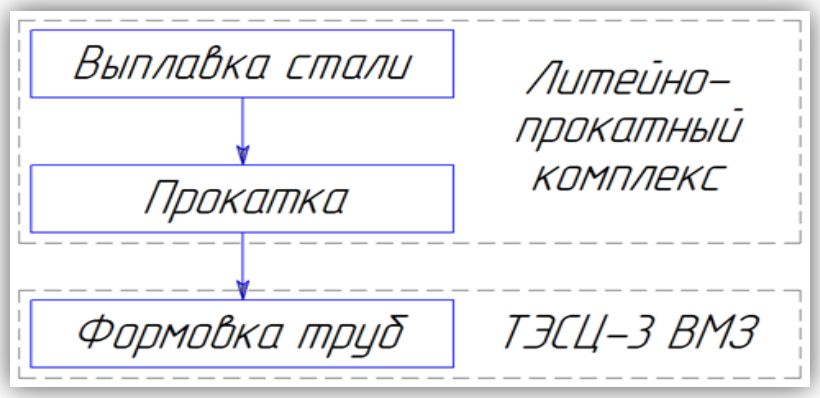


Рис. 1. Схема вертикальной инеграции для труб малого диаметра

2.1 Литейно-прокатный комплекс

Проект был реализован в кратчайшие сроки и с применением уникальных технологий. Введение в эксплуатацию первой очереди ЛПК позволило обеспечить высококачественным горячекатаным рулонным прокатом трубоэлектросварочные цеха Выксунского металлургического и Альметьевского трубного заводов для производства труб малого и среднего диаметра, соответствующих международным стандартам. На ЛПК также предусмотрена возможность освоения выпуска высококачественного проката для нужд автомобильной промышленности, судостроения, железнодорожных вагонов, цистерн и другого подвижного состава, используемого ОАО "РЖД".

Мощность первой очереди ЛПК составляет 1,5 млн. тонн рулонов в год. Планируется увеличение мощности до 3 млн. тонн (вторая очередь). Объем инвестиций в первую очередь ЛПК составил 1,2 млрд. долларов, во вторую очередь планируется инвестировать 600 млн. долларов.



Рис. 2. Клети чистовой группы НШПС

2.2 Стан 5000

Для обеспечения производства труб большого диаметра ОМК был построен современный толстолистовой прокатный Стан 5000. Также планируется возведение литейного агрегата для изготовления слябов под Стан 5000. Это позволит замкнуть цепочку производства труб большого диаметра:

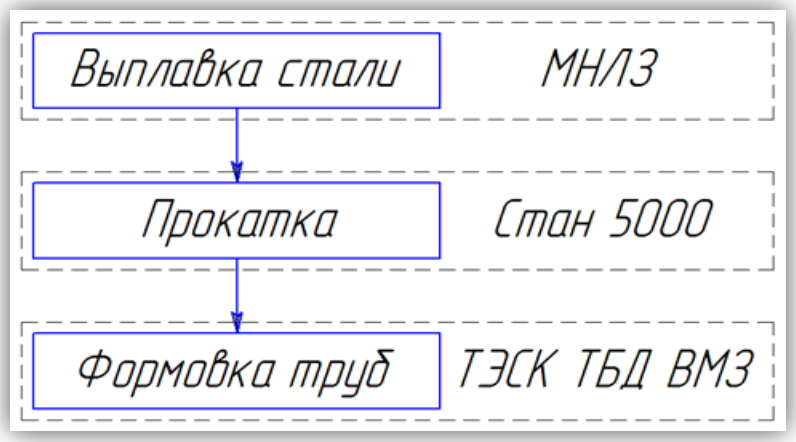


Рис. 3. Схема вертикальной инеграции для труб среднего и большого диаметра

25 ноября 2011 года введен в эксплуатацию Металлургический комплекс стан 5000 в Нижегородской области г.Выкса ОАО «Объединённая металлургическая компания». Стан 5000 спроектирован как специализированный комплекс по производству листа для трубной продукции. Широкий лист производства Стан 5000 предназначен для изготовления труб большого диаметра, используемых для строительства магистральных нефте- и газопроводов. Мощность комплекса позволит выпускать до 1,2 млн тонн широкого листа в год. Общая стоимость проекта оценивается в 45 млрд. рублей.

Продукция Стан 5000 может использоваться в судостроении, машиностроении, атомной энергетике, и других металлоемких отраслях.

Основным назначением толстолистового Стана 5000 является производство листового проката из низколегированных марок стали для изготовления электросварных труб большого диаметра (от 508 мм (20″) – до 1420 мм (56″)) на трубоэлектросварочных станах ОАО «ВМЗ». Листы трубного назначения будут производиться в диапазоне толщины от 7,0 до 50,0 мм, ширины 1400 до 4800 мм, длиной до 12300 мм из сталей категорий прочности К52-К70, L360 - L830, X52-X120.

Толстолистовой Стан 5000 рассчитан на годовую производительность 1,2 млн. тонн готового листа.



Рис.4 Аналогичный Стан 5000 компании SMS Siemag N

Таблица 1. Характеристики заготовки (сляба) и продукции Стана 5000

Толщина сляба, мм	250 ÷ 400
Ширина сляба, мм	1300 ÷ 2600
Длина сляба, мм	2500 ÷ 4800
Вес, т	40
Толщина проката, мм	7 ÷ 50
Ширина проката, мм	1400 ÷ 4800
Длина проката, мм	7000 ÷ 40000
Марки стали	Трубные стали (до X120). Стали для машиностроения, судостроения и т.п.

Для обеспечения годовой производительности 1,2 млн. т готового проката требуется 1,33 млн. т сляба в год.

Схема толстолистового Стана 5000

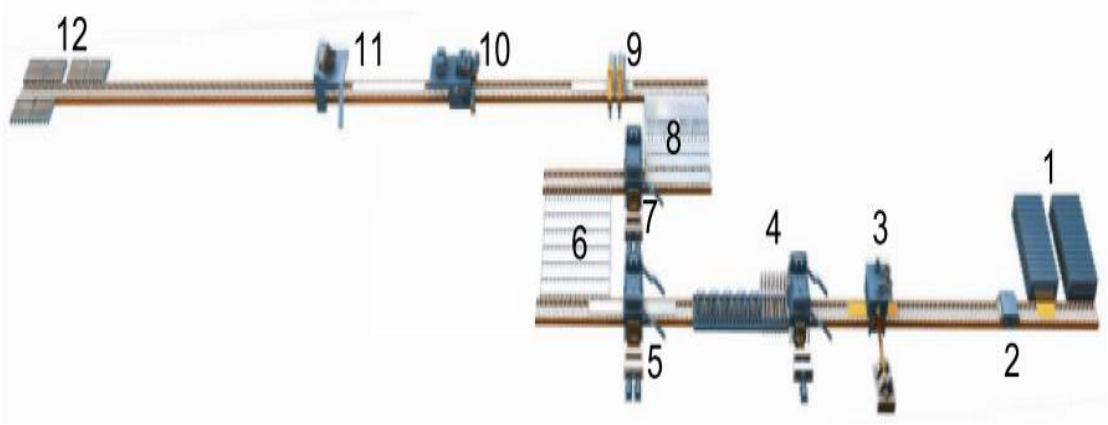


Рис. 5. Схема толстолистового Стана 5000

1. Нагревательные методические печи;
2. Гидросбив окалины;
3. Четырёхвалковая клеть;
4. Установка контролируемого ускоренного охлаждения;
5. Машина горячей правки;
6. Холодильник;
7. Машина холодной правки;
8. Инспекционный стол с кантователем;
9. Установка ультразвукового контроля;
10. Комбинированные ножницы для обрезки кромок и для продольной резки.

Технологическая схема работы Стана 5000

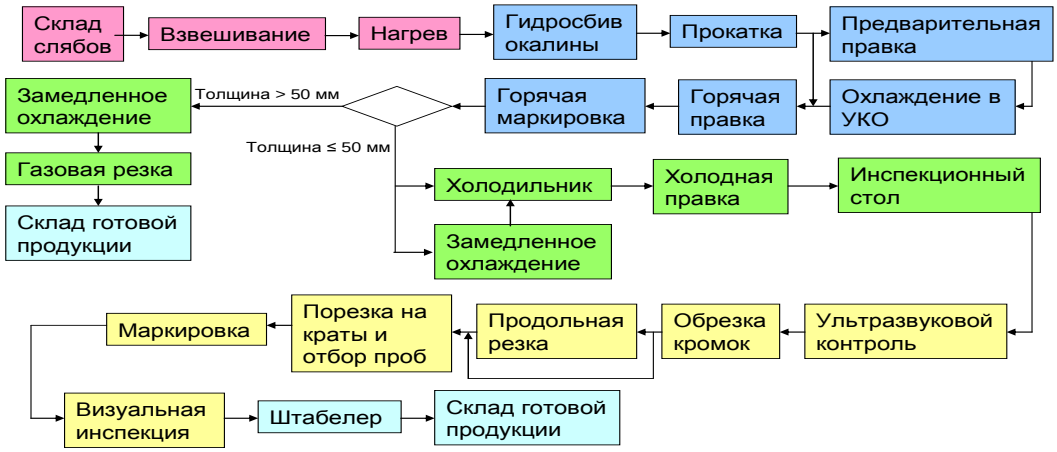


Рис. 6. Технологическая схема работы Стана 5000

Четырехвалковая клеть

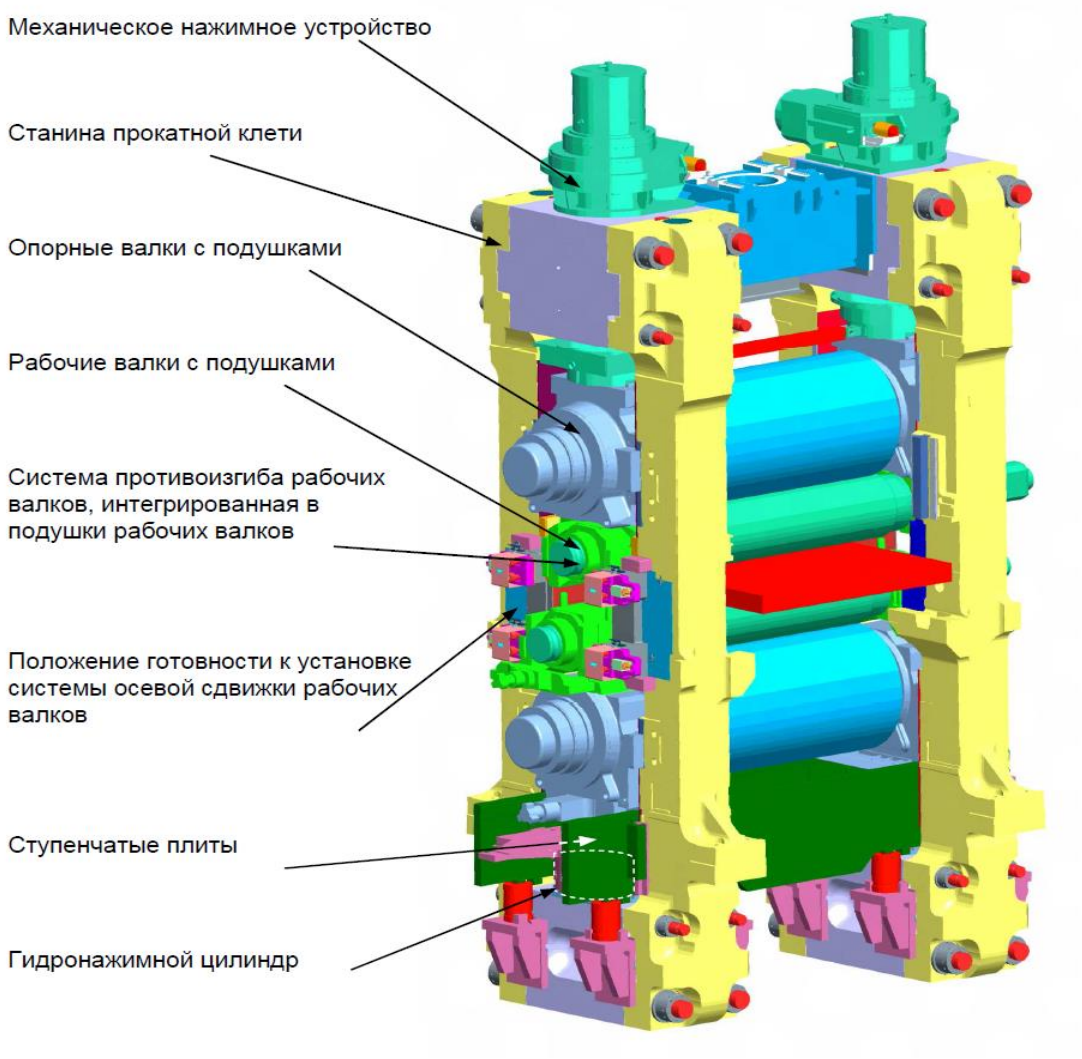


Рис. 7. Схема четырехвалковой клети

Таблица 2. Характеристики четырехвалковой клети.

Диаметр рабочих валков, мм	1110 – 1210
Диаметр опорных валков, мм	2100 – 2300
Длина бочки рабочих валков, мм	5300
Длина бочки опорных валков, мм	4950
Скорость прокатки, м/с	0 – 7,3
Максимальное усилие прокатки, МН	120
Максимальный момент прокатки, МН·м	8,8

3. Исследование энергосиловых параметров Стана 5000 ВМЗ

В связи с важностью проекта Стана 5000 в обеспечении листовым прокатом производство труб, основной задачей является понять при каких режимах деформации сляба можно производить прокатку, при этом не превышая максимально допустимые значение энергосиловых параметров стана (силы и момента прокатки). Были проведены расчёты для самых нагруженных проходов: первой проход черновой стадии (1200 С), когда наша заготовка имеет максимальные габаритные размеры и обжимать её весьма затруднительно и первый проход чистовой стадии (750 С), при данной температуре

сопротивление деформации намного больше. В результате получили предельные значения обжатий, для чего провели расчеты при разных значениях степеней деформации для каждой температуры. Расчеты были проведены на основе методики, представленной в работе [1]. Материалом прокатки выбрана трубная марка стали класса прочности К60. Предел текучести данной марки при 1200 С равен 20 МПа, при 750 С – 90 МПа.

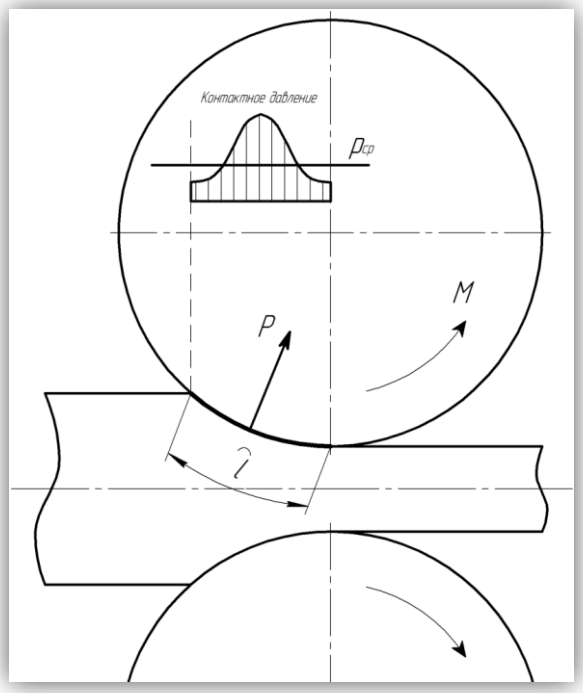


Рис.8. Схема очага деформации

- Момент прокатки:

$$M = P * l = 30{,}5 * 0{,}134 = 4{,}1\ (МН * м)$$

где M – момент прокатки, МН*м;
P – сила прокатки, МН;
l – длина дуги захвата, мм;

- Сила прокатки:

$$P = F * p_{ср} = 349283 * 87{,}18 = 30{,}5\ (МН)$$

где $p_{ср}$ – среднее контактное давление, МПа;
F – контактная площадь, мм^2;

- Контактная площадь:

$$F = b_{ср} * l = 2603{,}402 * 134{,}164 = 349283\ (мм^2)$$

где F – контактная площадь, мм^2;
$b_{ср}$ – средняя ширина, мм;

- Длина дуги захвата:

$$l = \sqrt{R\Delta h} = \sqrt{600 * 30} = 134{,}164\ (мм)$$

где l – длина дуги захвата, мм;
R – радиус валков, мм;
Δh – изменение толщины, мм;

- Средняя толщина:

$$h_{ср} = \frac{h_1 + h_0}{2} = \frac{400 + 375}{2} = 385\ (мм)$$

где $h_{ср}$ – средняя толщина, мм;
h_0 – начальная толщина, мм;

h_1 – конечная толщина, мм;

- Отношение $\frac{l}{h_{ср}} = \frac{134,164}{385} = 0,348$
- Конечная ширина:

$$b_1 = b_0 + \frac{1,15\Delta h\left(l - \frac{\Delta h}{2\mu}\right)}{h_0} = 2600 + \frac{1,15 * 30 * \left(134,164 - \frac{20}{2 * 0,2}\right)}{400} = 2605,103\ (мм)$$

где b_1 – конечная ширина, мм;
b_0 – начальная ширина, мм;
μ – коэффициент трения;

- Средняя толщина:

$$b_{ср} = b_0 + \frac{2}{3}(b_1 - b_0) = 2600 + \frac{2}{3}(2605,103 - 2600) = 2603,4\ (мм)$$

- Среднее контактное давление:

$$p_{ср} = \gamma * n'_\sigma * n''_\sigma * n'''_\sigma * n_b * k = 1,15 * 1,058 * 1,410 * 1 * 1,15 * 44 = 87,18\ (МПа)$$

где γ - коэффициент, учитывающий влияние среднего нормального напряжения;
n'_σ - коэффициент внешнего трения;
n''_σ - коэффициент внешних зон;
n'''_σ - коэффициент, учитывающий натяжение;
n_b - коэффициент ширины;

- Скорость деформации:

$$u = \frac{v * \Delta h}{l * h_0} = \frac{1500 * 30}{134,164 * 400} = 0,839\ (с^{-1})$$

где u – скорость деформации, $с^{-1}$;
v – скорость прокатки, мм/$с^2$;

- Истинное сопротивление:

$$k = n_u * n_n * \sigma = 2,2 * 1 * 20 = 40\ (МПа)$$

где n_u – коэффициент, учитывающий скорость деформации;
n_n – коэффициент наклепа;
σ - предел текучести, МПа

Таблица 3. Исходные данные для расчетов.

Номер варианта	1	2	3	4	5	6
Начальная толщина h_0, мм	400	400	400	125	125	125
Конечная толщина h_1, мм	370	340	310	120	115	110
Обжатие e, %	7,5	15	22,5	4	8	12
Начальная ширина b_0, мм	2600	2600	2600	4500	4500	4500
Температура прокатки, T, ^{0}C	1200	1200	1200	750	750	750
Предел текучес-ти, σ, МПа	20	20	20	90	90	90
Диаметр валка, D, мм	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Скорость прокатки, мм/с	1500	1500	1500	3000	3000	3000

По исходным данным проведены расчеты. Для автоматизации исследовательской работы в EXCEL была составлена программа для расчёта энергосиловых параметров прокатки. Результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты расчетов.

Номер варианта	1	2	3	4	5	6
Длина дуги захвата, мм	134,164	189,737	232,379	54,772	77,460	94,868
Средняя толщина, мм	385	370	355	122,5	120	117,5
Отношение l/Hср	0,348	0,513	0,655	0,447	0,645	0,807
Конечная ширина, мм	2605,103	2606,855	2601,909	4501,753	4504,060	4506,192
Средняя ширина, мм	2603,402	2604,570	2601,273	4501,169	4502,706	4504,128
Контактная площадь, мм^2	349283	494182	604481	246539	348778	427299
Скорость деформации, мм/с	0,8	1,2	1,5	2,2	3,1	3,8
Истинное сопротивление деформации, МПа	44	46	48	171	180	189
Среднее контактное давление, МПа	87,18	85,15	84,17	326,25	318,16	315
Сила прокатки, МН	30,5	42,1	50,9	80,4	111	134,6
Момент прокатки, МН*м	4,1	8	11,8	4,4	8,6	12,8

Результаты расчетов показывают, что режимы прокатки слябов толщиной 400 мм по варианту 1 и 2 осуществимы на Стане 5000 как по силе, так и по моменту прокатки. Вариант 3 не осуществим из-за превышения допустимого момента прокатки.

Режим прокатки слябов толщиной 125 мм по варианту 4 и 5 также осуществимы на Стане 5000, следует отметить, что вариант 5 является критическим, так как значения силы и момента прокатки находятся на верхнем уровне возможностей Стана 5000. Вариант 6 не осуществим – превышение, как силы, так и момента прокатки.

Ниже представлены результаты расчётов в графическом виде, что позволяет наглядно оценить возможности стана по заданным параметрам.

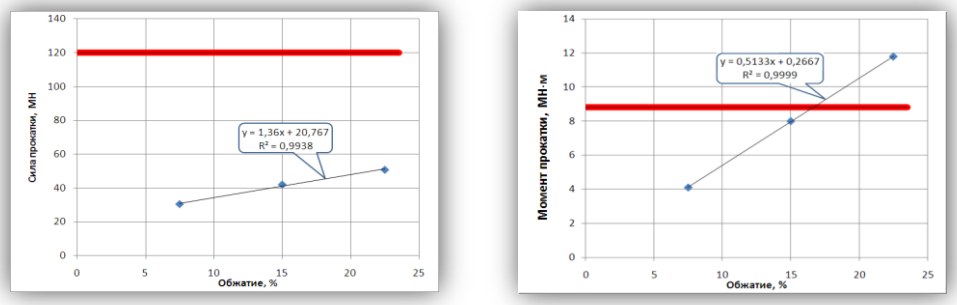


Рис. 9. Зависимость силы и момента прокатки от обжатия при прокатке заготовки 400 мм.

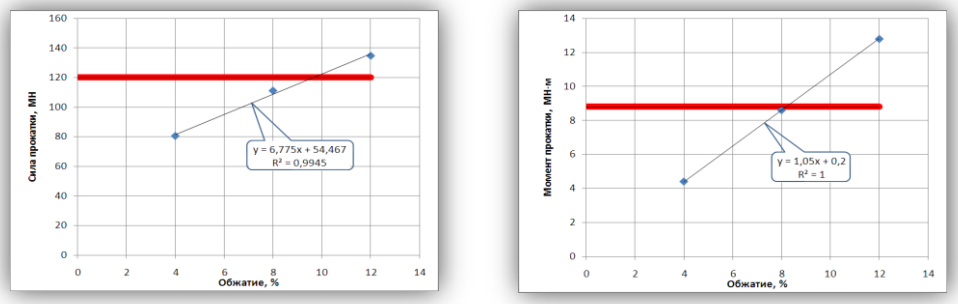


Рис. 10. Зависимость силы и момента прокатки от обжатия при прокатке заготовки 125 мм.

На основании графических данных можно утверждать, что максимально возможное обжатие в первом случае составляет около 16,5%; во втором случае – 8,5%.

4. Заключение

Проведённый обзор производственных возможностей и перспектив развития Выксунского металлургического завода, а так же исследования энергосиловых возможностей Стана 5000 позволили сформулировать следующие выводы:

1. ВМЗ обладает существенными мощностями по производству труб различного диаметра (до 1420 мм), в.т.ч. труб ответственного назначения, применяемых для нефтегазопроводов в условиях крайнего севера.
2. Стратегия компании, направленная на достижение вертикальной интеграции в области производства труб, успешно воплощается в уже существующем Литейно-прокатном комплексе и строящемся Стане 5000.
3. Стан 5000 Выксунского металлургического завода является одним из самых мощных прокатных станов в мире и способен производить толстый лист по самым высоким мировым стандартам.
4. Возможности Стана 5000 позволяют успешно использовать его для прокатки наиболее толстых слябов при жёстких начальных условиях. Так при прокатке в первом проходе сляба толщиной 400 мм, возможно, задать обжатие равное 16,5%. А при прокатке промежуточного подката толщиной 125 мм – до 8,5%.

Литература

1. *Никитин Г.С.* Теория непрерывной продольной прокатки. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009
2. *Никитин Г.С., Восканьянц А.А., Крюков К.А.* Расчёт энергосиловых параметров при горячей прокатке в непрерывной группе сортового стана. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010
3. Теория прокатки: Справочник / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин, А.В. Третьяков, Г.С. Никитин. М.: Металлургия, 1982

http://оао-вмз.рф/Призводство/МКС-5000

Секция XI

Электронные технологии в машиностроении

Председатель: **Панфилов Юрий Васильевич**
д.т.н, профессор, заведующий кафедрой «Электронные технологии в машиностроении» (МТ-11), МГТУ им. Н.Э. Баумана

Ученый секретарь: **Бычков Сергей Павлович**
ассистент кафедры «Электронные технологии в машиностроении» (МТ-11), МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 621.793.182, 621.893

ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ ПРЕССОВАННЫХ МИШЕНЕЙ

Владимир Николаевич Калинин [(1)], Мария Григорьевна Попова [(2)],
аспирант 3-го года обучения [(1)], бакалавр 3 курса [(2)],
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»,
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Научный руководитель: А.И.Беликов,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

ВВЕДЕНИЕ

Современные тонкопленочные покрытия, формируемые методами осаждения различных материалов в вакууме, получили широкое распространение в различных областях, в том числе, и в многочисленных отраслях машиностроения. Всплеск работ, направленных на разработку и исследования технологий формирования вакуумных покрытий, обеспечивающих повышение износостойкости деталей и снижение трения в узлах механизмов, инициирован возникновением таких направлений, как нанотехнологии и наноинженерия поверхности. Появление современных методов исследования наноразмерной структуры материалов способствовало развитию технологий в направлении создания наноструктурированных и нанокомпозитных тонкопленочных покрытий. Последние три десятилетия знаменательны большим количеством работ в области создания и развития вакуумных технологий нанесения твердосмазочных покрытий на основе слоистых анизотропных материалов, таких, как дисульфиды и диселениды тугоплавких металлов (ДТМ) (MoS_2, WS_2, $MoSe_2$, WSe_2 и др.). Перспективы применения этих покрытий связаны с уникальными трибологическими характеристиками, открытием аномально низкого трения, а также высокими вакуумными характеристиками покрытий (низкий поток газовыделения и отсутствие в спектре сернистых соединений), получаемых методом катодного распыления. Последняя особенность определяет применимость этих покрытий для прецизионных узлов трения вакуумного технологического оборудования. Фактически, являясь своеобразным антиподом графиту, который обладает низким внутренним трением в атмосферных условиях, рассматриваемые материалы проявляют свои лучшие свойства в условиях вакуума и инертных сред, не теряют функциональные свойства при более высоких температурах.

Основным недостатком покрытий на основе ДТМ является низкая стойкость к абразивному изнашиванию, что сужает области применения этих материалов. Поэтому одним из перспективных направлений повышения эксплуатационных характеристик перспективных твердосмазочных покрытий на основе тонкопленочных слоистых материалов, стало развитие технологий создания композитных покрытий на основе ДТМ путем их применения в композитных структурах совместно с твердыми износостойкими материалами. Один из вариантов реализации технологии – одновременное осаждение на поверхность изделия распыленных потоков твердого и твердосмазочного материалов, в результате которого формируется 3D-нанокомпозитная структура покрытия, обеспечивающая повышенную износостойкость твердосмазочного покрытия.

В настоящее время реализация такой технологии осуществляется путем одновременного осаждения из нескольких источников нанесения компонентов покрытия, например Ti и MoS_2, Ti+Al и MoS_2 и т.п. Качество получаемого покрытия в существенной степени определяется соотношением компонентов и обеспечением постоянства этого

соотношения по всей рабочей поверхности изделия. На результат влияет согласованная работа источников и пространственное распределение потоков распыленных материалов в области обрабатываемых поверхностей изделия. Вследствие наличия косинусоидального закона распределения потока распыляемого материала по различным направлениям относительно источника, скорость осаждения потока материала в различных, пространственно разнесенных точках поверхности изделия может отличаться существенно и достигать отличия в несколько крат [1].

Анализ литературных источников показывает, что даже менее существенные отклонения в стехиометрическом составе покрытия приводит к значительному изменению их свойств. Так, в работе [2] исследования влияния состава композитных покрытий Au–MoS_2 на электрические и триботехнические свойства свидетельствуют о том, что изменение содержания золота с 32 ат.% до 59 ат.% оказывает существенное влияние как на электрическое сопротивление, которое уменьшается при этом на порядок, так и на коэффициент трения и его стабильность. В работе [3] результаты исследований свидетельствуют о том, что изменение процентного содержания титана с 5 ат.% до 14 ат.% в нанокомпозитных покрытиях Ti-WS_2 приводит к изменению износостойкости в 1,5 раза. Следовательно, разработка технологии формирования на поверхности изделий однородных, воспроизводимых по составу нанокомпозитных твердосмазочных покрытий является актуальной задачей.

Предлагаемая в настоящей работе технология является альтернативой рассмотренному выше варианту реализации, и позволяет повысить однородность стехиометрического состава покрытия, особенно для крупных деталей. Реализуется такая технология путем распыления из одного магнетронного источника единой прессованной композитной мишени, содержащей все компоненты будущего покрытия, что обеспечивает не только повышение однородности состава покрытия, но также и снижение сложности и стоимости технологической системы оборудования (уменьшение количества источников и упрощение технологической оснастки).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для проведения экспериментальных исследований предварительно была осуществлена подготовка распыляемых композитных мишеней на основе нескольких компонентов, включая дисульфид молибдена. В работе использовалась распыляемая мишень, полученная перемешиванием смеси порошков Ti+Al+MoS_2 с последующим холодным прессованием [4]. Внешний вид экземпляра готовой мишени диаметром 78 мм, представлен на рис.1.

Работы по распылению изготовленных мишеней и нанесению покрытий на их основе проводились в лаборатории кафедры МТ-11 «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им.Н.Э.Баумана. Для этих целей использовалась вакуумная технологическая установка, оснащенная автономным источником ионов и сбалансированными магнетронными распылительными системами под планарные мишени диаметром 78 мм (рис.3). Вакуумная система установки состоит из механического форвакуумного и паромасляного насосов и обеспечивает достижение остаточного вакуума в технологической камере на уровне 10^{-3} Па. Двухканальная газовая система с компьютерным управлением обеспечивает формирование газовой смеси требуемом соотношении на основе рабочего (аргон) и реактивного (азот) газов. Нанесение покрытий осуществлялось при давлении аргона порядка 10^{-1} Па. Покрытия наносились одновременно на полированные ситалловые подложки и на пластинки из стали Х18Н10Т, шероховатость поверхности которых составляла порядка 0,4 R_a. Перед нанесением покрытий предварительно выполнялась обработка поверхности потоком ионов аргона из автономного источника ионов типа «Радикал» с холодным катодом.

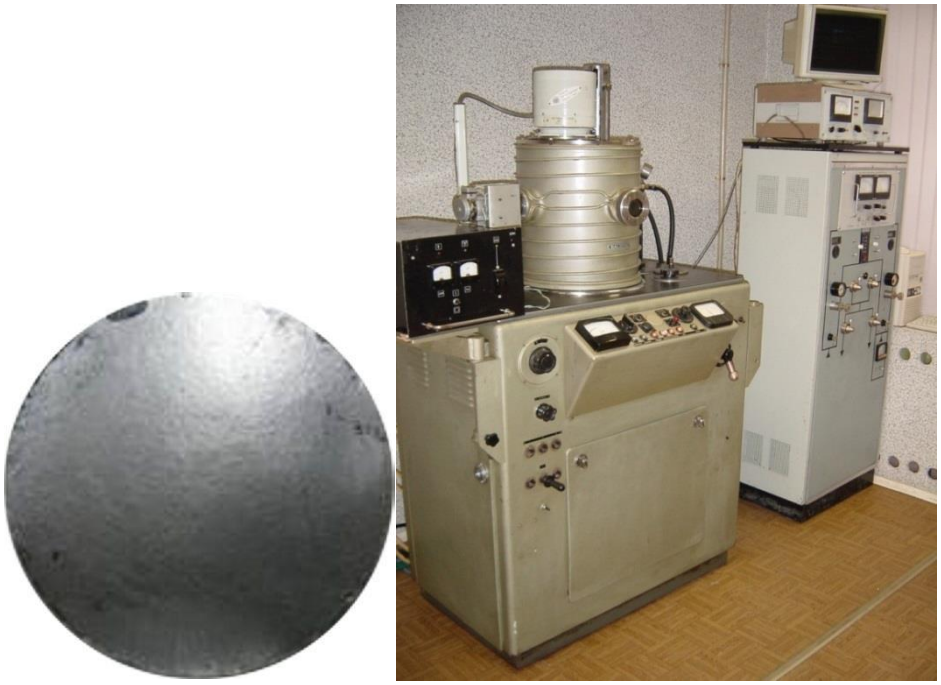


Рис. 1. Внешний вид прессованной мишени и вакуумной установки, используемой для нанесения покрытий методом магнетронного распыления

Целью проводимых исследований являлось изучение особенностей распыления многокомпонентной прессованной мишени на основе металлов (титан и алюминий) и дисульфида молибдена, обладающего анизотропной структурой слоистого типа, и являющегося полупроводниковым материалом, исследование химического состава покрытий, синтезируемых распылением такой мишени.

Сущность методов нанесения тонких пленок путем распыления в вакууме, бомбардируемой ионами инертного газа, мишени заключается в кинетическом воздействии ускоренных тяжелых ионов инертного газа, как правило, аргона, на поверхность мишени из распыляемого материала, в результате чего образуется поток пленкообразующих частиц, осаждаемых на поверхность изделия. Метод обеспечивает формирование качественных покрытий на основе самых разнообразных материалов, включая тугоплавкие металлы, практически любые неорганические материалы, используемые в современной технике, поддаются распылению ускоренными ионами и на их базе могут быть сформированы покрытия сложного состава и структуры, включая оксиды и нитриды металлов.

Среди методов распыления широкое промышленное распространение получил метод магнетронного распыления, обеспечивающий процесс при более низких давлениях и более высокие скорости роста пленок. В магнетронной распылительной системе повышенные характеристики достигаются за счет применения скрещенного магнитного и электрического полей, что приводит к возникновению аномального тлеющего разряда и увеличению плотности плазмы. Применение в магнетронных распылительных системах современных источников питания дает возможность стабилизировать процесс по различным параметрам: току, напряжению, мощности, что обеспечивает высокую управляемость процессом напыления и качество получаемых покрытий.

Особенностью метода нанесения тонких пленок путем распыления является различие коэффициентов распыления (количество распыленных атомов, приходящихся на один бомбардирующий поверхность ион) для разных материалов и его зависимость от энергии ионов. Данное обстоятельство приводит к тому, что на различных временных стадиях распыления мишеней сложного состава, могут возникать флуктуации в пропорциях, распыляемых с поверхности различных элементов, результатом чего может стать отклонение от требуемого состава элементов в покрытии. Этому может также

способствовать наличие возможных неоднородностей в составе мишени. Поэтому изучение особенностей распыления мишеней сложного состава при формировании нанокомпозитных покрытий является важной задачей в плане повышения качества покрытий, формируемых по такой технологии.

Для изучения микроструктурных особенностей и состава поверхности распыляемых мишеней на различных временных стадиях процесса распыления и выявления связи состава поверхности с составом полученных покрытий, для исследований были выбраны следующие образцы:

1. Мишень состава Ti+Al+MoS_2, которая использовалась для отработки режимов нанесения покрытий TiAl+MoS_2, с частично выработанной (распыленной) поверхностью
2. Три комплекта образцов покрытий, полученных на разных стадиях использования мишени Ti+Al+MoS_2.

Изучение поверхности мишени и образцов выполнялось на растровом электронном микроскопе "VEGA II" Tescan, оснащенного рентгеноспектральным микроанализатором "INCA 350" фирмы «Oxford Instruments», который использовался при измерении химического состава поверхности мишеней и полученных покрытий.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Мишень состава Ti+Al+MoS_2

На поверхности мишени состава Ti+Al+MoS_2 были определены три зоны (рис.2), в различных областях которых изучались поверхностные микроструктуры, образовавшиеся после распыления, и проводились измерения процентного состава химических элементов в приповерхностных областях. Распыленная на поверхности мишени зона эрозии (кратер распыления) образуется в соответствии с конфигурацией магнитного и электрического полей магнетрона и представляет собой кольцевую канавку с поперечным профилем, как показано на рис.2. В пределах поперечного профиля этой канавки исследуемые зоны были выбраны следующим образом:

1. "**I зона** (не расп.обл.)" – располагается на краю поверхности мишени. Поскольку эта часть поверхности практически не подвергается распылению, представляет собой исходное состояние мишени после прессования.
2. "**II зона**, 7мм от края" – располагается в 7 мм от края кратера распыленной области мишени и находится примерно по центру половины образующей профиля распыления, между краем кратера и его самой глубокой точкой.
3. "**III зона**, 12мм от края" – располагается примерно в 12 мм от края кратера распыленной области мишени и находится в самой глубокой точке кратера профиля распыления.

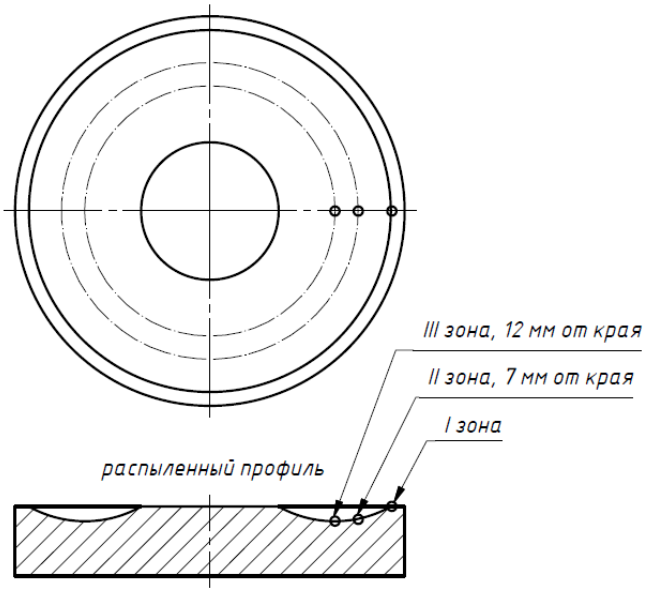
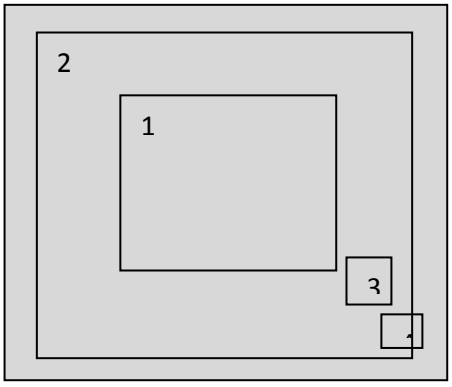


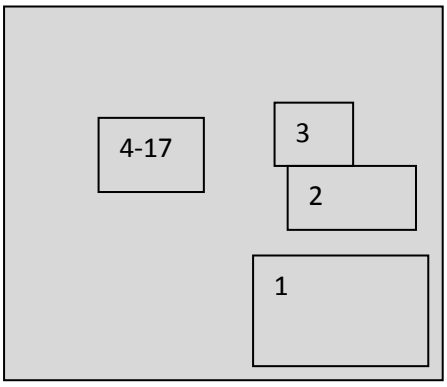
Рис. 2. Схема расположения исследуемых зон на поверхности мишени Ti+Al+MoS_2

В рассматриваемых зонах изучение поверхности осуществлялось в относительно крупных областях, для определения усредненного химического состава элементов, а также в мелких областях, имеющих характерные геометрические особенности и поверхностные микроструктуры, для определения локального химического состава. Примерное расположение исследованных областей, в пределах выбранных зон, показано на рис.3.

I зона (не расп.обл.)



II зона 7мм от края



III зона 12мм от края

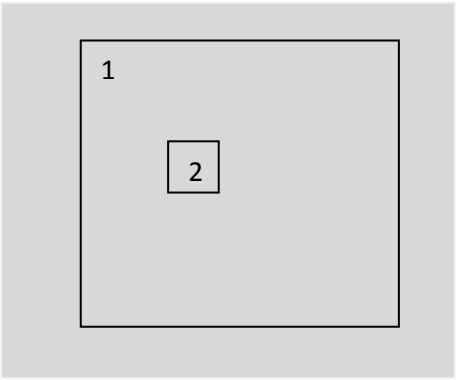


Рис. 3. Схема расположения областей в исследуемых зонах на поверхности мишени Ti+Al+MoS_2, в которых проводились измерения и изучались поверхностные структуры

Измерения химического состава элементов, полученные для указанных на рисунке 3 областей, были обработаны и приведены к атомному процентному соотношению основных компонентов мишени. Полученные для характерных областей поверхности результаты отражены в таблице 1, номера областей на рис.3 соответствуют номерам, указанным в таблице.

На основании полученных данных, для исходной поверхности мишени, зоны "I" (области №1-4 из таблицы 1), определен состав MoS_2 со средним содержанием порядка 89 ат.% (по данным для большей области, №2) и отклонением (неоднородностью) для разных областей зоны "I" на уровне 3%.

Для металлов, содержание которых в мишени существенно меньше, удельная неоднородность состава в рассматриваемых областях существенно выше и достигает 50% для алюминия и 20% для титана, при этом их доля в общем составе примерно одинакова.

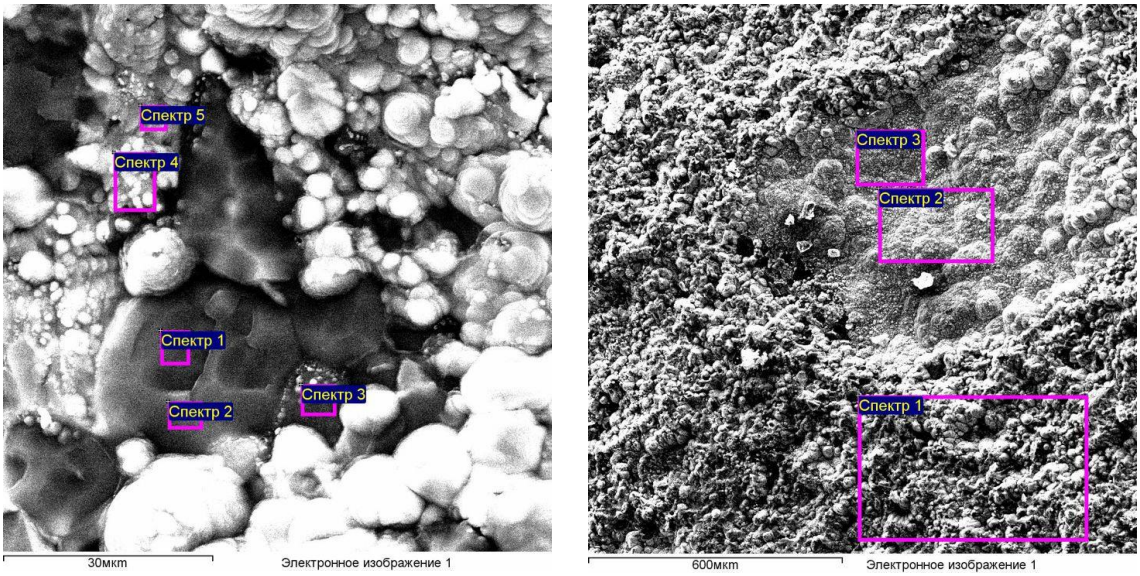
Отличия в среднем содержании компонентов для исследуемых зон "II" и "III" составляет 25% для дисульфида молибдена, порядка 1% - для алюминия, а для титана, - примерно, 2,5 процента. Сравнение составов не распыленной зоны с зонами, которые находятся на разных участках профиля распыления и были распылены с разной интенсивностью, свидетельствует о существенной, кардинальной разнице в составах, причем, соотношение между дисульфидом молибдена и металлами меняется, практически, на противоположное. При этом между распыленными зонами "II" и "III" нет такой существенной разницы в составах. Можно предположить, что такое распределение компонентов в не распыленной зоне "I" (с существенным преобладанием в составе дисульфида молибдена) сформировалось в процессе прессования мишени, и вследствие особенностей кристаллического строения MoS_2, низкого внутреннего трения, он был выдавлен в тонкий приповерхностный слой. После распыления этого приповерхностного слоя соотношение компонентов выравнивается.

Таблица 1. Химический состав областей мишени Ti+Al+MoS_2 (атомные проценты)

№ области	Al,%	Ti,%	MoS_2,%	Площадь области, мкм^2
I Зона (не расп.обл.)				
1	2,74	5,68	91,59	111000
2	**5,3**	**5,8**	**88,9**	**260000**
3	5,34	7,1	87,55	1200
4	2,63	5,62	91,75	500
II Зона, 7 мм от края				
1	**57,45**	**36,11**	**6,44**	**286000**
2	1,85	5,01	93,05	49000
3	2,63	5,42	91,95	20000
4	96,33	0,66	3,01	20,4
5	92,08	7,2	0,73	20,4
6	98,79	0,7	0,51	20,4
7	53,26	4,44	42,3	48
8	8,07	7,05	84,87	15,7
9	18,09	10,1	71,81	4,6
10	15,78	12,1	72,12	18,7
11	26,44	10,35	63,2	0,7
12	20,64	8,5	70,89	4
III Зона, 12 мм от края				
1	**58,09**	**37,07**	**4,83**	**714000**
2	92,42	1,36	6,23	4900

На рисунке 4а показан участок исследуемой поверхности (области анализа для спектров 1-3 соответствуют областям №№1-3 из зоны "II" таблицы 1). Участок содержит явно просматривающееся на изображении пятно какого-то одного компонента и, как показывают данные (области №2 и №3 из табл.1) это пятно преимущественно состоит из дисульфида молибдена.

Дальнейшее изучение локальных участков поверхности, имеющих площади в несколько или десятки квадратных микрометров, позволило обнаружить следующие особенности структуры поверхности, образовавшейся в результате распыления. На рисунке 4б показан увеличенный участок поверхности (области спектров 1-5 соответствуют областям №№4-8 из табл.1), содержащий частицы алюминия (спектры 1-3, области №№4-6), которые расположены ниже уровня частиц дисульфида молибдена (спектр 5, область №8). Это свидетельствует о формировании разноуровневой поверхностной структуры вследствие различия коэффициентов распыления разных компонентов мишени.



а) б)

Рис. 4. Электронная микроскопия участков поверхности мишени Ti+Al+MoS_2:
а) с локальным пятном MoS_2 (спектр 2,3), б) частицы Al на участке (спектр 1-4).

Еще одна из характерных областей поверхности приведена на рис.5. Основное содержимое областей спектров 1-4 (области №№9-12 из табл.1) на рис.5 составляет дисульфид молибдена (примерно 70 атомных процентов), который распыляется более медленно и в результате его распыления образуются слоистые пирамидальные структуры округлой формы, зауженные к вершине. На снимке явно просматриваются пустоты вокруг пирамидальных структур, образовавшиеся за счет распыления окружающих элементов с более высоким коэффициентом распыления.

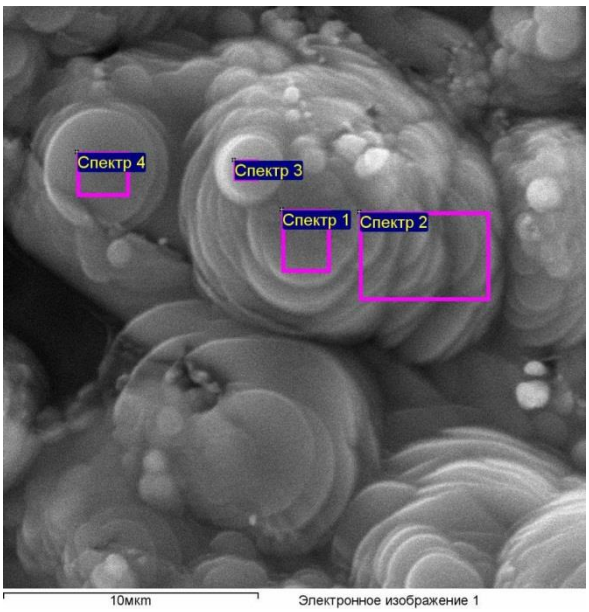


Рис. 5. Электронная микроскопия участка поверхности мишени Ti+Al+MoS_2 с пирамидальными образованиями слоистой структуры

Покрытия, полученные распылением мишени состава Ti+Al+MoS_2

Для изучения химического состава покрытий, сформированных при распылении изучаемой мишени, были подготовлены три группы образцов с покрытиями, наносимыми одновременно на плоские подложки из стали и ситалла:

1. Покрытие №1. Формировалось на промежуточной стадии распыления мишени Ti+Al+MoS_2.
2. Покрытия №2 и №3. Наносились в двух последовательных, отдельных вакуумных циклах, одно за другим, после чего мишень была снята с магнетрона и передана на электронно-микроскопические исследования.

Таблица 2. Химический состав покрытий (данные в атомных процентах), нанесенных распылением мишени Ti+Al+MoS_2

№ покрытия	Al,%	Ti,%	MoS_2,%
Подложка - сталь			
№1. Образец 15.04	52,98	32,5	14,53
№2. Образец 03.06	53,53	33,23	13,24
№3. Образец 04.06	53,04	34,7	12,25
Подложка - ситалл			
№1. Образец 15.04	51,94	33,61	14,45
№2. Образец 03.06	51,85	34,95	13,2
№3. Образец 04.06	51,52	36,07	12,41
№3. Образец 04.06	51,52	36,07	12,41



а) б) в)

Рис. 6. Электронная микроскопия поверхности: а) подложка из стали; б) покрытие №1 на подложке из стали; в) покрытие №1 на подложке из ситалла.

Полученные результаты анализа химического состава покрытий, сформированных на различных подложках, представлены в таблице 2. Внешний вид поверхности подложки из стали Х18Н10Т представлен на рис.6а. Поверхность образца на основе подложки из стали с нанесенным покрытием представлена на рис.6б. Поверхность покрытия на подложке из ситалла изображена на рис.6в.

Полученные данные (таблица 2) свидетельствуют о некотором изменении соотношения титана и дисульфида молибдена в составе покрытий в процессе выработки мишени, при практически постоянном содержании алюминия. Так, с увеличением времени использования мишени происходит нарастание доли титана в составе покрытия и одновременное снижение доли дисульфида молибдена.

ВЫВОДЫ

На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1. В процессе холодного прессования многокомпонентной мишени Ti+Al+MoS_2 возможно вытеснение дисульфида молибдена в поверхностные слои, что проявляется в повышенном содержании дисульфида молибдена на поверхности мишени.
2. По мере распыления мишени, вследствие различия коэффициентов распыления различных материалов, на локальных участках поверхности возникают неоднородности состава, которые могут быть существенными. В исследовании были обнаружены области с локальным отклонением состава на десятки процентов.
3. Измерения химического состава на относительно больших участках (около квадратного миллиметра) свидетельствуют о примерно равных средних составах элементов с различием в несколько процентов. Однако для исследуемого профиля распыленного кратера обнаружено некоторое снижение доли дисульфида молибдена с увеличением глубины.
4. По мере распыления мишени и увеличении ее выработки происходят изменения в соотношения титана и дисульфида молибдена в составе покрытий, при этом содержание алюминия практически не меняется. Так, с увеличением времени использования мишени наблюдается увеличение доли титана и одновременно снижается доля дисульфида молибдена.

Литература

1. *Беликов А.И., Калинин В.Н., Никонов И.И.* Вакуумная технология формирования нанокомпозитных твердосмазочных покрытий методом магнетронного распыления композитной мишени. // Материалы XX Научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника». – М., 2013. – С.194-198.

2. *J.R.Lince, H.I.Kim, P.M.Adams, D.J.Dickrell, M.T.Dugger.* Nanostructural, electrical, and tribological properties of composite Au–MoS_2 coatings. // Thin Solid Films, №517, 2009. – С.5516–5522.
3. *T.W.Scharf, A.Rajendran, R.Banerjee, F.Sequeda.* Growth, structure and friction behavior of titanium doped tungsten disulphide (Ti-WS2) nanocomposite thin films. // Thin Solid Films, №517, 2009. – С.5666–5675.
4. *Беликов А.И., Коробова Н.В., Никонов И.И., Берстенев М.В.* Формирование комбинированных упрочняющих покрытий вакуумными ионными методами // Материалы 8-й Международной конференции «Пленки и покрытия – 2007». – С-Петербург, 2007. – С. 81-87.

УДК 621.3.049.75

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОПЕРАЦИИ ПРЕССОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Игорь Юрьевич Балашов,
студент 6 курса,
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Ю.С. Боброва,
ассистент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

1. Введение

Процесс изготовления многослойной структуры является ключевым в изготовлении современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). На настоящий момент, все виды печатных плат (в том числе гибкие, жестко-гибкие) для формирования многослойной структуры проходят операцию прессования, порой даже и не однократно. Продуктом операции прессования является многослойная печатная плата (МПП), для обеспечения требуемого качества которой, необходимо учитывать множество факторов.

В процессе прессования заготовка подвергается воздействию тепла и давления. Так как все используемые для прессования материалы связующих слоев являются реактопластами, в определенный момент, когда материал получит необходимое количество теплоты (для каждого типа материалов свое), связующее вещество меняет свои свойства, приобретая состояние геля, которое обладает значительно большей текучестью.

Именно благодаря повышению текучести, преобразованию связующего вещества в гель, заполняется топология печатной платы, заполняются утопленные переходы, вытесняется воздух из зазоров и образуется монолитная, целостная структура МПП.

Момент преобразования связующего вещества в гель, называемый «моментом гелеобразования», является критическим для всей операции прессования, так как определяет время выдержки при давлении первой стадии и начало второй стадии процесса. Если давление увеличивать раньше до момента гелеобразования, то выдавливается большое количество смолы. Это может грозить «диэлектрическим истощением» - разделяющий прессуемые слои слой связующего материала будет иметь недостаточную толщину, чтобы обеспечить требуемую изоляцию. Если давление отверждения прикладывается с опозданием, то заполняются не все пустоты, и монолитность МПП не обеспечивается [1].

В настоящее время определение момента перехода от давления первой ступени к давлению отверждения в реальном производстве осуществляют эмпирическим путем, что

приводит к ухудшению воспроизводимости параметров МПП, браку при неправильном определении свойств материала или при неправильном учете режима операции прессования.

Предлагаемый метод, рассматриваемый в данной статье, позволит повысить выход годных на операции прессования и повысить воспроизводимость параметров МПП. Благодаря этому методу, станет возможным исключить такие дефекты как диэлектрическое истощение, вздутие, остаточные пустоты, слабая связь между слоями.

2. Сущность предлагаемого метода повышения качества операции прессования МПП

Топология печатной платы рельефна. Это означает, что два электрически разобщенных проводника ПП находящихся рядом образуют две обкладки одного печатного конденсатора. В практике изготовления печатных плат зачастую прибегают к замене объемных конденсаторов подобными печатными эквивалентами.

Таким образом, при рассмотрении печатного конденсатора в процессе прессования (рис. 1.) можно сделать вывод, что в момент гелеобразования, значение емкости должно возрасти из-за заполнения пространства между обкладками диэлектрическим связующим веществом. В этот момент, изменения емкости и необходимо повысить давление прессования для наилучшего заполнения пустот и вытеснения газов связующим веществом. Это обеспечит наилучшее качество МПП.

В рассматриваемом методе, предлагается проводить измерения значений емкости печатных конденсаторов в процессе прессования. Момент резкого изменения измеряемой емкости будет свидетельствовать о моменте гелеобразования.

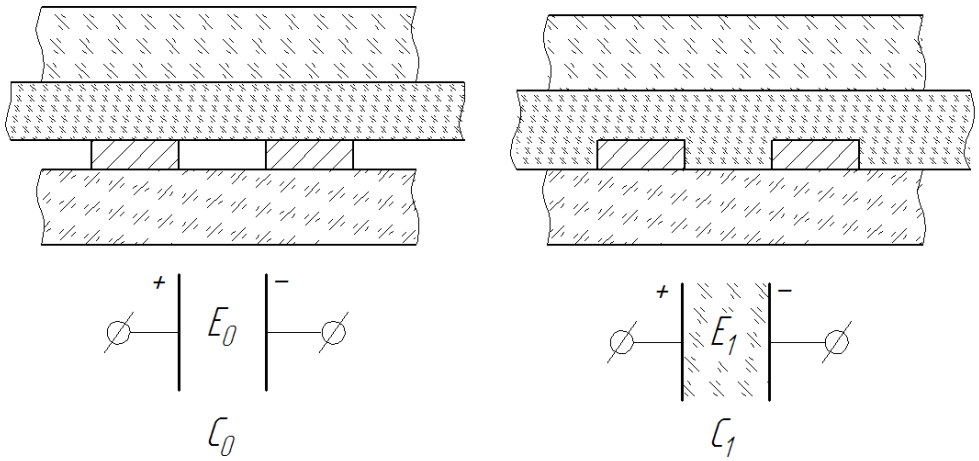


Рис. 1. Поперечный разрез модели печатного конденсатора до момента гелеобразования (слева) и после момента гелеобразования (справа) и их эквивалентные условные электрические обозначения.

Определив момент гелеобразования непосредственными измерениями в процессе прессования, можно гарантировать, что повышение давления до давления второй стадии прессования будет осуществлено вовремя. Таким образом, можно повысить качество операции прессования МПП и исключить такие дефекты как диэлектрическое истощение, вздутие, остаточные пустоты, слабая связь между слоями.

3. Реализация метода

Для осуществления метода необходимо изготовить печатные конденсаторы только на одном внутреннем слое из всего пресс-пакета будущей МПП. Этим обеспечивается достаточная технологичность метода, поскольку не требуется каких-либо дополнительных операций. Кроме того, контролируемые элементы могут быть расположены как в основном поле слоя, так и на технологических полях, чем обеспечивается достаточная гибкость и удобство применения метода.

Измеряемые печатные конденсаторы создаются совместно со всей остальной топологией слоя печатной платы. Необходимо лишь при проектировании топологии одного выбранного внутреннего слоя МПП на свободном поле добавить печатный элемент из библиотеки программы и развести его к краю платы.

При прессовании необходимо обеспечить возможность контакта обкладок печатного конденсатора с измеряющим устройством, которое будет считывать значение емкости. Возможность контакта можно обеспечить различными способами. К примеру, для проведения эксперимента в данной работе пресс-пакет был смещен к краю рабочей области пресса, таким образом, чтобы контактные площадки обкладок печатных конденсаторов были доступны для прямого контакта. Для практического применения метода наиболее рациональным будет применение пайки тонких проводов к контактным площадкам обкладок печатных конденсаторов на технологических полях внутреннего слоя.

4. Разработка и изготовление тестовых образцов

В рамках данной работы были разработаны тестовые образцы для экспериментального подтверждения метода определения момента гелеобразования. Тестовые структуры (ТС) представляют собой многослойные печатные платы, состоящие из 4 слоев на 2 основаниях. На внутреннем слое ТС широко известными методами печатных плат изготовлена топология печатных конденсаторов в различных областях рабочего поля заготовки, для возможности контроля момента гелеобразования по всей плате.

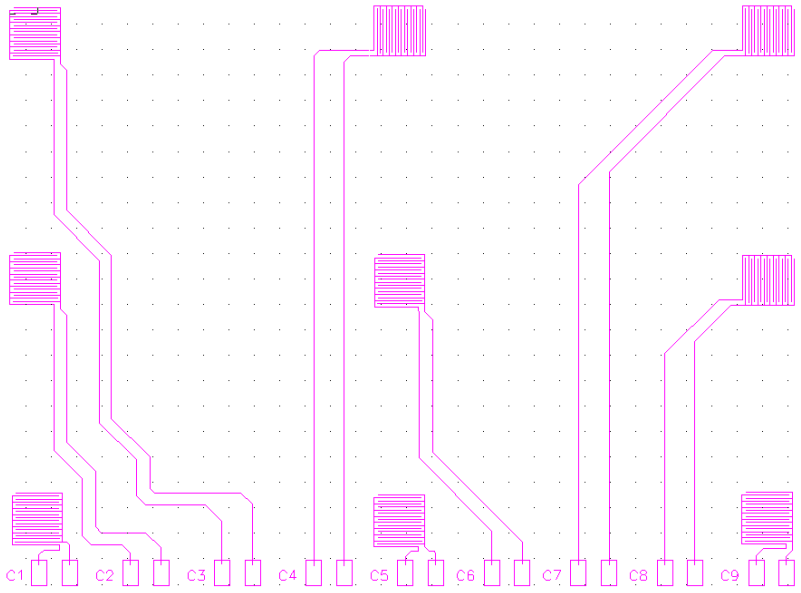


Рис. 2. Топология тестовой структуры

Каждое значение из печатных емкостей можно определить следующим образом:

$$Ci = Ci_{эл} + Ci_{пр}$$

где $Ci_{эл}$ – емкость печатного конденсатора, $Ci_{пр}$ – емкость подводящих проводников

$$Ci_{эл} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} = 8{,}854 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{\varepsilon_{возд} + \varepsilon_{осн} + \varepsilon_{преп}}{3} \cdot \frac{h \cdot L}{Z} \cdot N$$

где, $\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}$ $\Phi/_{м}$ – электрическая постоянная, ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды, S=h·L – площадь обкладок конденсатора, d=Z – расстояние между обкладками равное зазору между проводниками, N=20 – число попарных обкладок образующих один расчетный конденсатор.

$$Ci_{эл} = 8{,}854 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{1 + 4{,}7 + 4{,}7}{3} \cdot \frac{35 \cdot 10^{-6} \cdot 12 \cdot 10^{-3}}{0{,}2 \cdot 10^{-3}} \cdot 20 = 1{,}289 \text{ пФ}$$

Согласно [2], действительная емкость всегда больше расчетной емкости на величину C_f, которая учитывает краевые эффекты для различного типа конденсаторов (рис. 13).

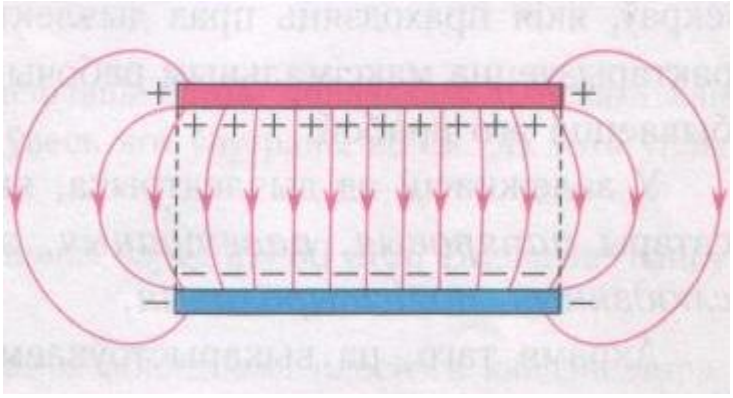


Рис. 3. Краевой эффект в параллельных пластинчатых конденсаторах

Для практических расчетов согласно [2] дополнительную емкость за счет краевых эффектов можно учесть в виде поправки к фактическим размерам пластин на 44% от их первоначальной величины. Таким образом, для емкости печатного конденсатора получаем значение

$$Ci_{эл} = 1{,}289 \cdot 1{,}44 \cdot 1{,}44 = 2{,}673 \text{ пФ}$$

Для расчета емкости подводящих проводников найдем погонную емкость. Для уменьшения влияния этой составляющей, при разработке ТС был увеличен зазор между проводниками до 2 мм.

$$Ci_{\text{пр.погон}} = 8{,}854 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{1 + 4{,}7 + 4{,}7}{3} \cdot \frac{35 \cdot 10^{-6}}{0{,}2 \cdot 10^{-3}} = 5{,}37 \text{ пФ/м}$$

С помощью программы проектирования ТС легко можно определить длину подводящих проводников с помощью функции Measure.

Таблица 1. Длины подводящих проводников к печатным конденсаторам, мм, пФ

$L_{пр1}$	$L_{пр2}$	$L_{пр3}$	$L_{пр4}$	$L_{пр5}$	$L_{пр6}$	$L_{пр7}$	$L_{пр8}$	$L_{пр9}$
5	70	150	150	5	60	150	60	5
$C_{пр.п1}$	$C_{пр.п2}$	$C_{пр.п3}$	$C_{пр.п4}$	$C_{пр.п5}$	$C_{пр.п6}$	$C_{пр.п7}$	$C_{пр.п8}$	$C_{пр.п9}$
0,027	0,376	0,806	0,806	0,027	0,322	0,806	0,322	0,027

Таким образом, получим расчетные значения емкостей ТС:

Таблица №2. Расчетные значения печатных конденсаторов ТС, пФ

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
2,70	3,05	3,48	3,48	2,70	2,99	3,48	2,99	2,70

После изготовления по технологиям печатных плат получили ТС готовую для проведения эксперимента.

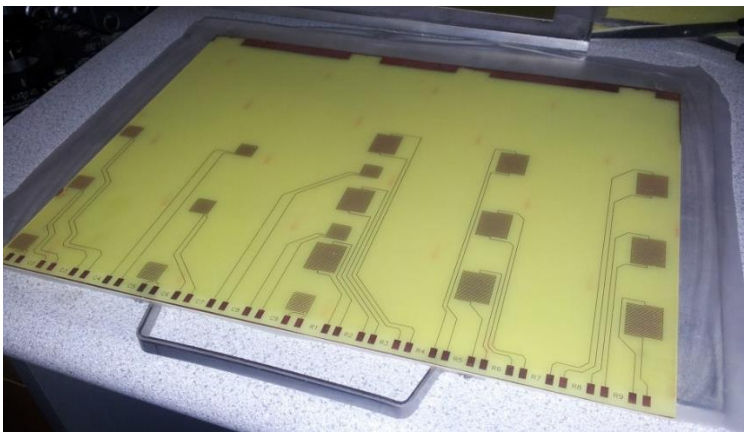


Рис. 4. Тестовая структура после этапа получения топологии (массив печатных конденсаторов – слева)

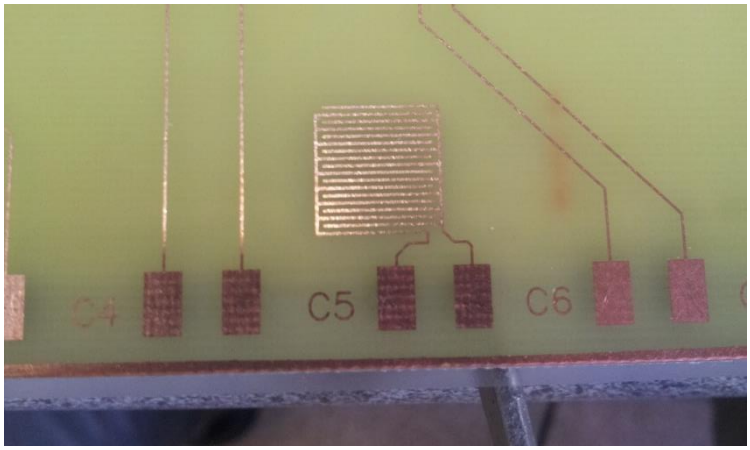


Рис. 5. Печатный конденсатор тестовой структуры

5. Экспериментальное подтверждение

После изготовления необходимой топологии был сформирован пресс-пакет, состоящий из двух оснований с промежуточным связующим слоем, антиадгезионных пленок и вспомогательных плит пресс-пакета. Этот набор помещен в лабораторный пресс Bungard RMP210, где были проведены предварительные измерения.



Рис. 6. Установка прессования МПП Bungard RMP210

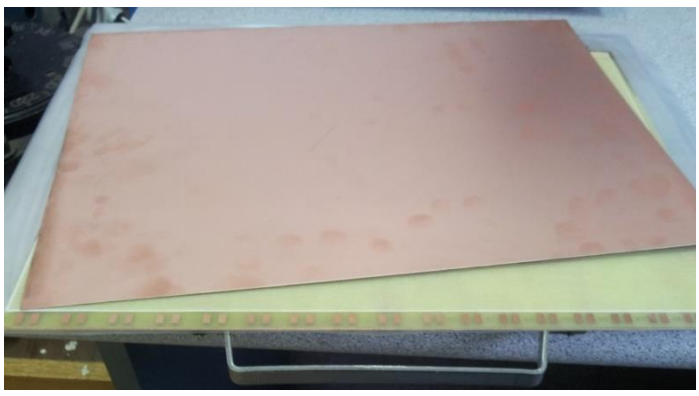


Рис. 7. Формирование пресс-пакета

Измерения эксперимента проводились на измерителе импеданса **LCR-821 фирмы Instek**



Рис. 8. Измеритель импеданса LCR-821 фирмы Instek

Таблица 3. Экспериментальные начальные значения емкостей печатных конденсаторов, пФ

Начальные данные									
№	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
1	3,08	3,38	4,21	4,22	3,08	3,35	4,08	3,45	3,01
2	3,03	3,52	4,05	4,13	3,15	3,58	3,97	3,32	3,05
3	2,95	3,35	4,15	3,98	3,07	3,37	3,95	3,45	2,97
4	3,05	3,58	3,95	4,2	2,97	3,33	4,02	3,51	2,92
5	3,07	3,37	3,98	3,97	2,99	3,52	3,92	3,33	3,09
Ci ср	3,036	3,44	4,068	4,1	3,052	3,43	3,988	3,412	3,008

По мере проведения операции прессования, непрерывно проводились измерения емкостей печатных конденсаторов тестовой структуры. Фиксировалось значение времени измерения, номер печатного конденсатора, значение его емкости и температуры плит пресса. Все данные были обработаны с помощью MathCAD 14.0 и представлены в виде следующих графиков:

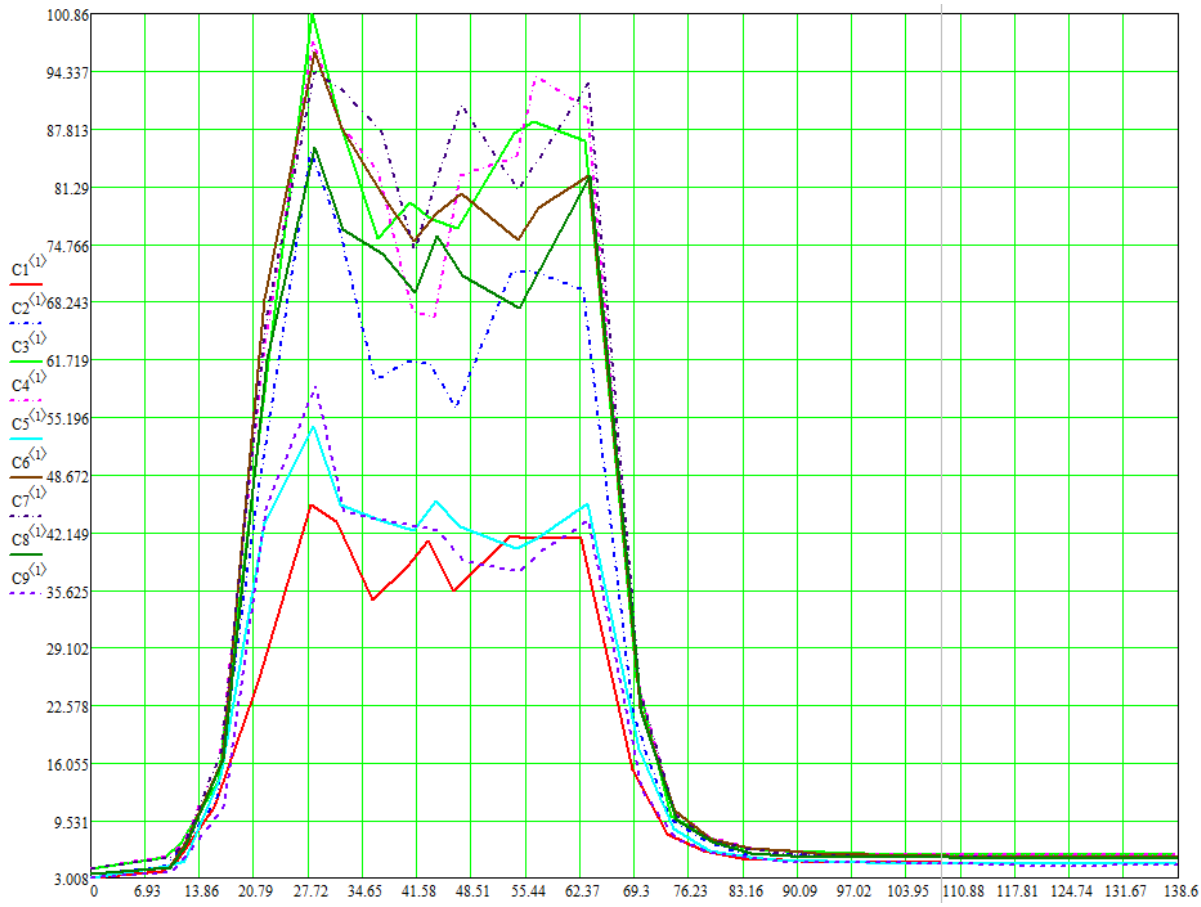


Рис. 9. Полученные графики зависимостей емкостей печатных конденсаторов от времени процесса прессования

Как видно из представленной совокупности графиков, наблюдается явная зависимость изменения емкости печатных конденсаторов в процессе прессования МПП. Рассмотрев более детально группы образцов емкостей можно определить характерный перелом значения емкости, который определяет момент гелеобразования.

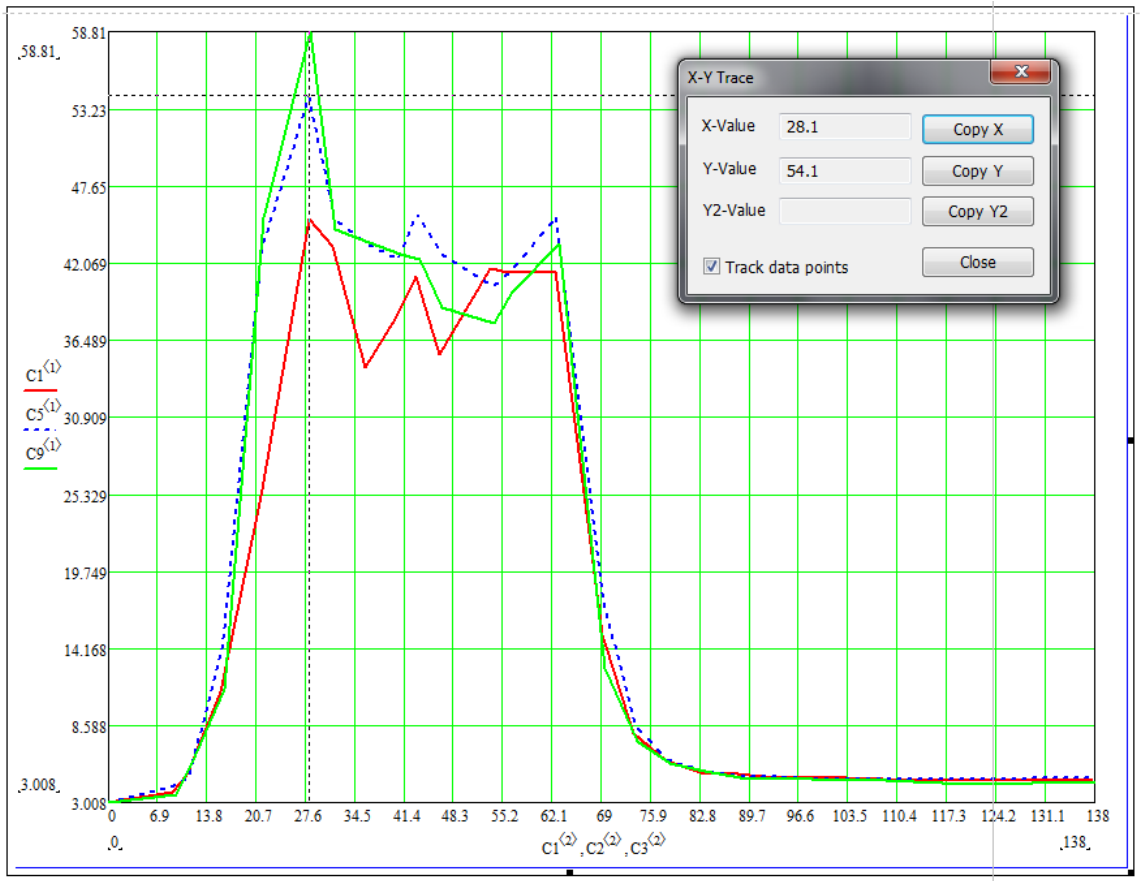


Рис. 10. Первая группа печатных конденсаторов, время гелеобразования 28,1 мин

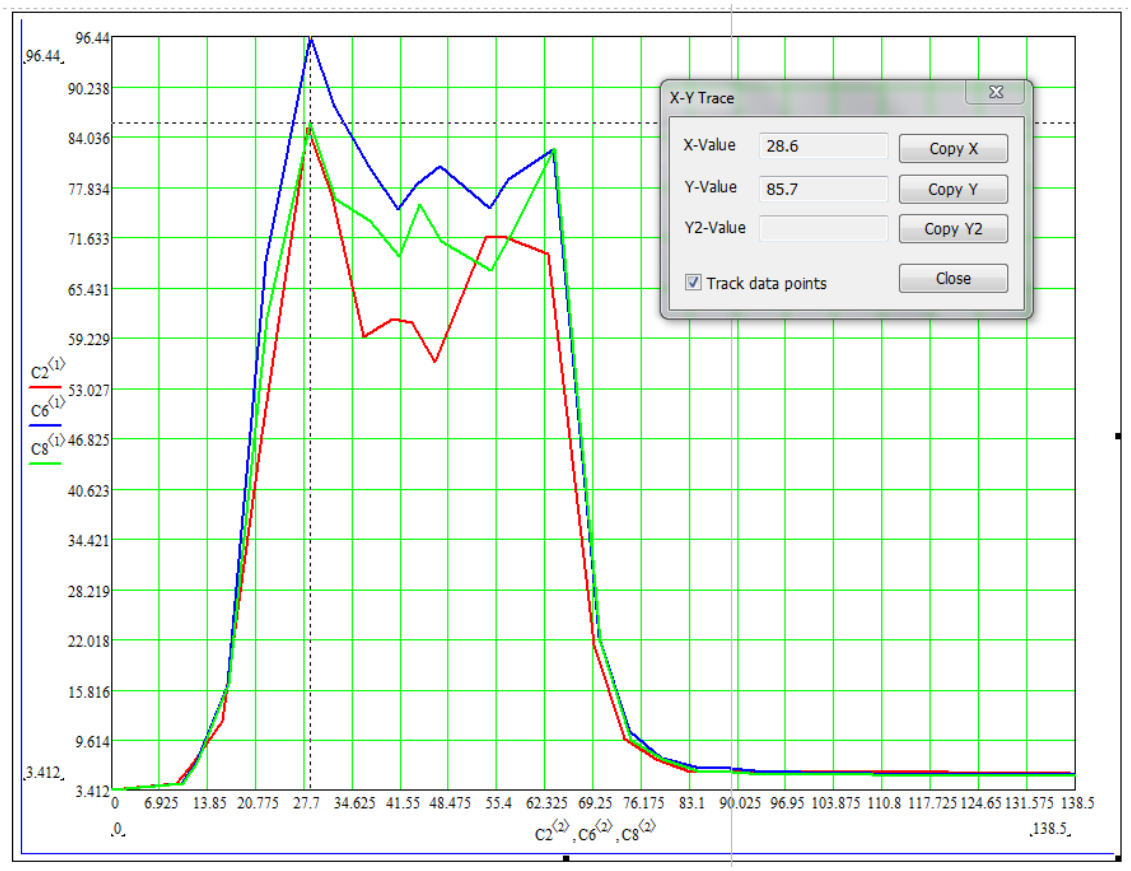


Рис. 11. Вторая группа печатных конденсаторов, время гелеобразования 28,6 мин

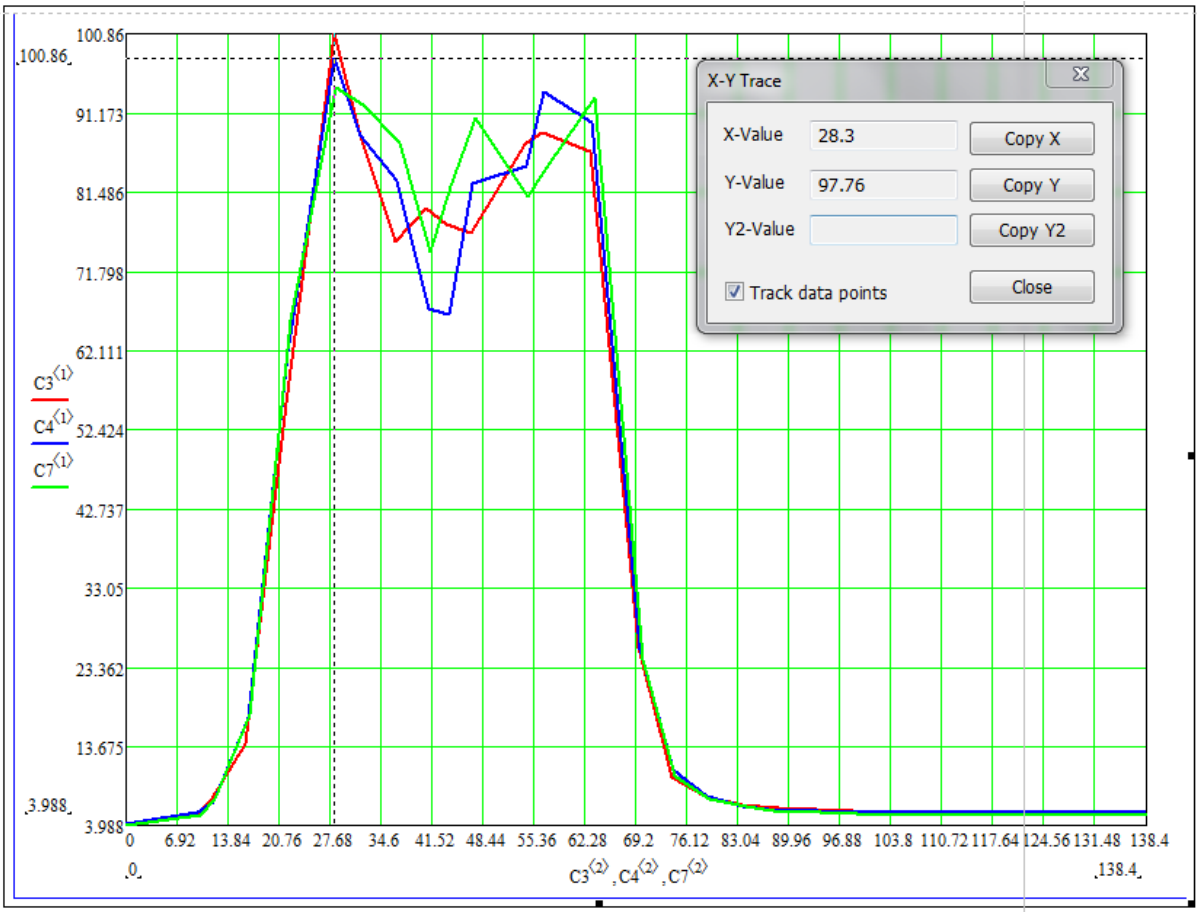


Рис. 12. Третья группа печатных конденсаторов, время гелеобразования 28,3 мин

6. Выводы по результатам эксперимента

Проанализировав полученные результаты эксперимента по прямому определению момента гелеобразования, можно сделать следующие выводы:

- Момент гелеобразования экспериментально определен с помощью измерения емкостей печатных конденсаторов, расположенных в рабочем поле прессуемой заготовки МПП;
- Момент гелеобразования наступает достаточно равномерно по площади заготовки;
- Для более точного определения необходимо фиксировать значения емкостей печатных конденсаторов с большей частотой, в эксперименте – 1 группа измерений в 5 минут. Желательно проводить измерения не реже 1 раза в 1 минуту.
- Изменение емкости в процессе прессования характеризуется сложной зависимостью, которая имеет 4 характерных участка:

1 участок – рост значения емкости;

2 участок – неравномерное изменение значение емкости после первого экстремума;

3 участок – уменьшение значения емкости;

4 участок – выравнивание значения до значений близким к рачетным после прессования.

- Момент гелеобразования характеризуется первым экстремумом зависимости емкости в процессе прессования
- Увеличение значения емкости на 1 участке – характеризует поведение «неидеальных» тел, которое не было учтено при расчете. Имеется ввиду, что под действием давления и температуры связующее вещество упруго и пластически деформируется в область между обкладками контролируемых конденсаторов, что приводит к изменению их емкости. Кроме того, значение диэлектрической проницаемости

связующего вещества при повышении температуры возрастает, что объясняет рост значений емкости печатных конденсаторов;

- Экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными. Согласно расчету, отношение начального значения емкости к значению емкости после прессования:

$$\frac{\varepsilon_{\text{возд}} + \varepsilon_{\text{осн}} + \varepsilon_{\text{преп}}}{3} \Big/ \frac{\varepsilon_{\text{осн}} + \varepsilon_{\text{преп}}}{2} = \frac{1 + 4.7 + 4.7}{3} \Big/ \frac{4.7 + 4.7}{2} = 0{,}73$$

Согласно полученным экспериментальным данным среднее значение этого отношения 0,68;

- Данный метод определения момента гелеобразования можно применять как метод повышения качества операции прессования используя программные средства для нахождения экстремума зависимости емкости от времени прессования, который характеризует момент гелеобразования.
-

Литература

1. Технология производства печатных плат, А.М. Медведев, Москва, Техносфера, 2005. – 360с.
2. Печатные схемы в приборостроении, вычислительной технике и автоматике, А.Т.Белевцев, Москва, Машиностроение, 1973г.
3. Печатные платы, справочник, под редакцией К.Ф. Кумбза, Москва, Техносфера, 2011. – 1015с.
4. Исследование новых технологических операций при изготовлении прецизионных печатных плат. Заполненные переходные отверстия, И.Ю.Балашов, Сборник статей «Студенческая научная весна 2012: Машиностроительные технологии» Москва, 2012г

УДК 543.271, 533.5.08

МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ И ВИБРОИЗОЛЯЦИИ

Мария Сергеевна Мосина,
Студентка 4 курса,
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.М. Базиненков,
Кандидат технических наук, ассистент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Введение

Современное исследовательское и технологическое оборудование требует точное перемещение объектов. Максимальная погрешность позиционирования механизма может достигать 1 нм при больших диапазонах перемещений объектов до 500 мм (в оборудовании сканирующей зондовой микроскопии и микролитографии). Кроме того, масса перемещаемого объекта может достигать 100 кг (для оборудования адаптивной оптики, в сверхбольших адаптивных составных телескопах) [8].

Кроме точного перемещения объектов необходимо обеспечить защиту прецизионного оборудования от вибраций, амплитуда которых может достигать 200 мкм при частотах 1…200 Гц. Наиболее эффективным способом защиты объектов от вибраций является активная виброизоляция, где виброперемещения компенсируются

дополнительным источником движения, перемещающим объект в противофазе с вибрациями.

Для точного перемещения объектов и активной их виброизоляции необходимо применение механизмов точного позиционирования (приводов).

Основные типы приводов

По принципу преобразования разных видов энергии в кинетическую энергию перемещения рабочего тела, приводы можно разделить на несколько основных групп [10]:

1. Тепловой привод – превращает тепловую энергию в кинетическую. Существует также несколько способов получения движения из тепловой энергии [2]

1.1. Привод с фазовыми превращениями. Использование системы фазового перехода - расширения и/или сжатия, которое происходит в некоторых материалах, когда они претерпевают фазовые изменения агрегатного состояния (твердое, жидкое, газообразное) (рис. 1).

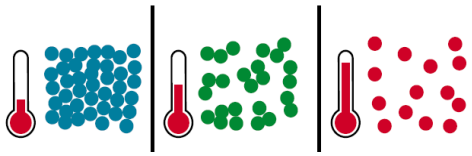


Рис. 1. Принцип действия привода с фазовыми превращениями [2]

1.2. Термомеханический привод. Размеры материала изменяются при изменении температуры. Термомеханические системы используют физическое расширение или сжатие, которое происходит в материалах, когда изменяется их температура в их первоначальной фазе (изменения агрегатного состояния не происходит) (рис. 2).

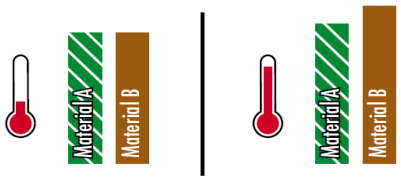


Рис. 2. Принцип действия термомеханического привода [2]

Например, по данному принципу работают биметаллические термостатические элементы, используемые в регулировании температуры помещений и в тостерах. Эти устройства используют различные скорости расширения двух материалов, соединенных вместе для получения различных деформаций.

1.3. Привод на основе материалов с памятью формы (СПФ). Материалы СПФ легко обратимо деформируются при снижении температуры. И восстанавливают изначальную деформацию при повышении температуры до начальной (рис. 3).

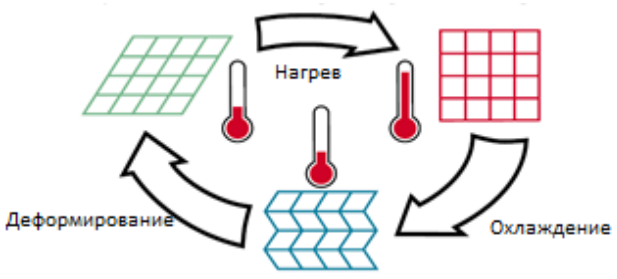


Рис. 3. Принцип действия привода с памятью формы [2]

Примером теплового привода является привод Vernatherm 5028. Вне зависимости от типоразмера привода, эти быстродействующие механизмы позволяют получать

высокие усилия на исполнительном элементе при больших диапазонах перемещений и эффективности управления [3].



Диапазон рабочих температур (° F)	30-300
Рабочий ход (в)	0,090 - 0,250
Максимальный ход (в)	0,300
Максимальная нагрузка (кг)	46
Мин Вернуться нагрузки (кг)	25

Рис. 4 Внешний вид и технические характеристики теплового привода Vernatherm 5028 [3]

2. Электрический привод. Данный механизм преобразует энергию электромагнитного поля в кинетическую энергию исполнительного механизма. Электропривод (ГОСТ Р 50369-92) - электромеханическая система, состоящая из преобразователей электроэнергии, электромеханических и механических преобразователей, управляющих и информационных устройств и устройств сопряжения с внешними электрическими, механическими, управляющими и информационными системами, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса (рис. 5).

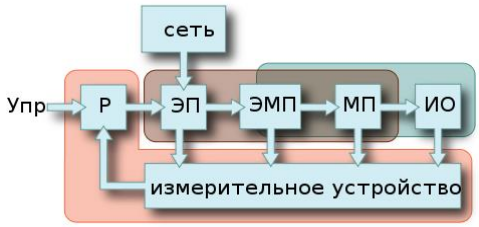


Рис. 5 Функциональная схема электропривода [11]

Существует несколько способов использовать электрическую энергию для получения перемещения [2].

2.1. Электрореологический (ЭР) привод. Работает за счет того, что рабочая среда, электрореологическая жидкость (ЭРЖ) меняет свои реологические свойства при воздействии на нее внешним электрическим полем (ЭР-эффект) (рис. 6).

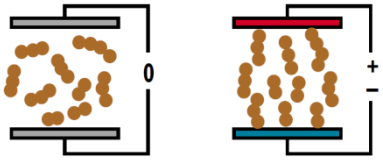


Рис. 6. Принцип действия ЭР-привода [2]

2.2. Магнитогидродинамический (МГД) привод. Движение возникает, когда частицы магнитной или парамагнитной жидкости подвергаются действию сильного магнитного поля (рис. 7).

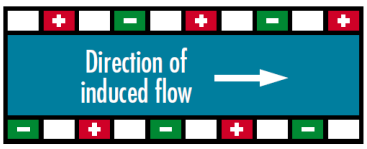


Рис. 7. Принцип действия магнитогидродинамического привода [2]

В результате движение может быть использовано для создания перепада давлений текучей среды, а также можно создавать поток или циркуляцию жидкости.

2.3. Привод на основе электрически-активных полимеров (ЕАП). Электрическое поле прикладывается к ЕАП и генерирует движение среды и мобильных положительных ионов в полимерном композите.

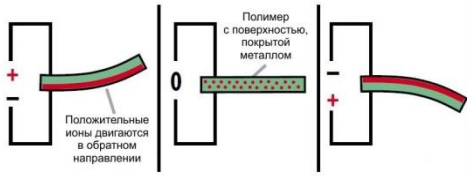


Рис. 8. Принцип действия привода на основе ЕАП [2]

ЕАП деформируется в результате напряжений, создаваемых движущимися ионами.

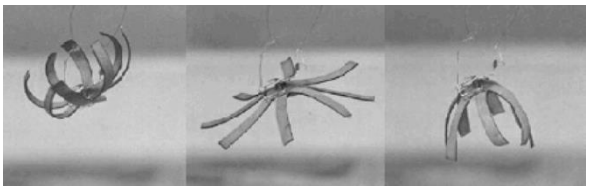


Рис. 9. Примеры деформирования ЕАП [2]

2.4. Электростатический привод. В результате приложения электрического поля (разности потенциалов) возникает электростатический заряд от избытка или дефицита свободных электронов в материале. Эти заряды могут притягиваться к противоположно заряженным объектам, или отталкиваться от аналогично заряженных объектов.

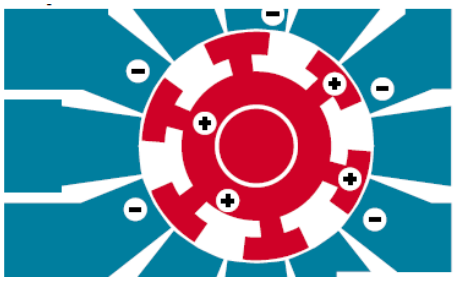


Рис. 10. Схема работы электростатического привода [2]

Таким образом, сила кулоновского взаимодействия между противоположно заряженными частицами позволяет приводить в движение детали сложных машин. Однако, при этом детали должны являться проводниками.

2.5. Магнитострикционный привод (на основе материалов, обладающих магнитострикционными свойствами). Магнитострикционные материалы обладают очень малыми, но устойчивыми и обратимыми изменением формы при воздействии магнитных полей. Рабочие органы развивают высокие усилия, но при малых диапазонах перемещений, как правило, менее чем на 1% от начального размера. Типичные магнитострикционные материалы включают комбинации редкоземельных элементов с железом, таких как TbFe (Терфенол) и TbDyFe (Терфенол-D).

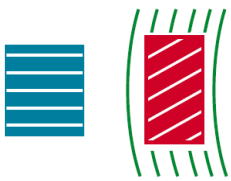


Рис. 11. Принцип действия магнитострикционного привода [2]

2.6. Электромагнитный привод. Как известно электрические и магнитные поля связаны друг с другом и одно порождает другое (уравнения Максвелла). Силы притяжения или отталкивания, возникающие в сердечнике электромагнитной системы, пропорциональны силе тока, пропускаемой через катушку индуктивности системы. Типичные примеры электромагнитных устройств: электрический двигатель, соленоид, реле, катушки звукового динамика и электронно-лучевые трубки.



Рис. 12. Принцип действия электромагнитного привода [2]

2.7. Пьезоэлектрический привод. Перемещения возникают из-за размерных изменений, возникающих в отдельных кристаллических материалах (пьезоэлектриках) при воздействии электрического поля или электрического заряда. Этот эффект носит название обратного пьезоэлектрического. Типичный пьезоэлектрический материал - кварц (SiO_2).

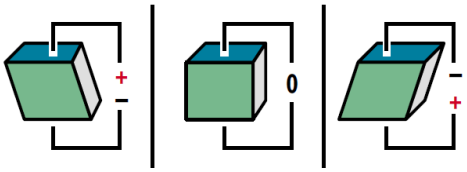


Рис. 13. Принцип действия пьезоэлектрического привода [2]

Примером электрического привода является компактный линейный привод – M272 (Physik Instrumente (PI), Германия) (рис. 14). Это керамический прямой привод, самоблокирующийся в состоянии покоя. [4].



Рис. 14. Внешний вид электрического привода M272 [4]

3. Гидравлический привод – совокупность устройств, предназначенных для приведения в движение машин и механизмов посредством гидравлической энергии, энергии сжатой жидкости (в подавляющем большинстве механизмов, масла).

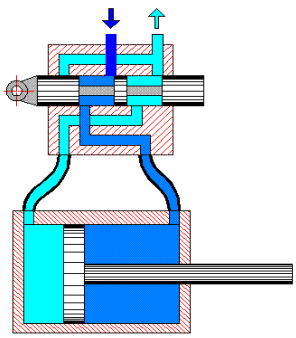


Рис. 15 Принцип действия золотникового гидрораспределителя, управляющего движением штока гидроцилиндра [9]

Приводной двигатель передаёт вращающий момент на вал насоса, который сообщает энергию рабочей жидкости. Рабочая жидкость по гидравлическим линиям (трубопроводам) через регулирующую аппаратуру поступает в гидравлические двигатели, где гидравлическая энергия сжатой среды преобразуется в механическую энергию движения поршня. После этого рабочая жидкость по гидролиниям возвращается либо в бак, либо на слив насоса [16].

Примером гидравлического механизма является гидравлический привод двойного действия Damcos BRC 125 (Emerson Electric Co (США)) (рис. 16). Обеспечивает высокий крутящий момент без необходимости больших размеров, и подходит для самых требовательных условий, при высокой вибрации и тяжелых условиях [1].



Рис. 16. Внешний вид привода Damcos BRC 125 [1]

4. Пневматический привод – совокупность устройств, предназначенных для приведения в движение машин и механизмов посредством энергии сжатого газа. Обязательным элементом пневматического привода являются компрессор (генератор пневматической энергии) и пневмодвигатель.

Приводной двигатель передаёт вращающий момент на вал компрессора, который сообщает энергию рабочему газу. Рабочий газ после специальной подготовки по пневматическим линиям через регулирующую аппаратуру поступает через пневмодвигатель в пневматические цилиндры, где пневматическая энергия сжатого воздуха преобразуется в механическую энергию перемещения штока.

Примером механизма является линейный трехкоординатный привод SLM (Festo AG & Co, Германия) (рис. 17).

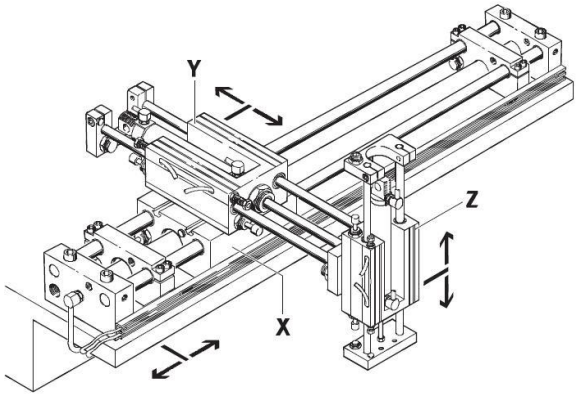


Рис. 17. Внешний вид пневматического привода LM (Festo, Германия)

При изучении возможных способов получения движения из преобразований различных видов энергий в кинетическую проведен анализ существующих приводов. Основные характеристики занесены в таблицу 1.

Выявлено, что все существующие приводы не полностью удовлетворяют всему комплексу требований, предъявляемых системами точного позиционирования и

виброизоляции. Поэтому для конкретного оборудования необходимо решать задачу выбора типа механизма и разработки его конструкции.

Таблица 1. Анализ характеристик приводов

Характеристика	Тип механизма			
	Тепловой	Пьезо	Гидро	Пневмо
Рабочие температуры, °С	-1,1…148,9	-20…+50	-20… +80	0..+60
Рабочий ход, мм	22,6… 63,5	50	500	2000
Максимальная нагрузка, кг	До 100	До 10	До 100	До 10
Погрешность, нм	До 10	0,05-10	1000	1000

Гидравлические механизмы на основе материалов управляемыми реологичекими свойствами

В настоящее время очень перспективными материалами являются материалы с управляемыми реологическими свойствами. Реология – наука о течении и свойствах вязких сред, проявляющих одновременно несколько фундаментальных свойств, вязкость, упругость, пластичность, прочность и т.д., в условиях воздействия на них сдвиговых, магнитных, электрических, тепловых, гравитационных и других полей.

Среди этих материалов можно выделить магнитореологические (МР) жидкости, ЭР-жидкости и МР-эластомеры. Эти материалы относятся к классу smart-материалов (как и магнитострикционные и пьезоэлектрические материалы).

Эти жидкости и эластомеры способны выступать в качестве рабочего тела в механизмов перемещений. При этом, подобные механизмы потенциально способны обеспечить достаточно высокие характеристики точности и быстродействия за счет управления средой прямым воздействием поля на нее без промежуточных инерционных элементов.

ЭР-жидкости способны менять свои реологические свойства под действием электрических полей. Это изменение носит название ЭР-эффекта. ЭР-жидкости – это суспензии, состоящие из неполярной дисперсной среды и твердой дисперсной фазы с достаточно высокой диэлектрической проницаемостью. Дисперсными средами могут служить неполярные или слабополярные органические жидкости. В качестве дисперсной фазы широко применяется кремнезем в различных модификациях. Размеры частиц не более 1-10 мкм.

МР-жидкости представляют собой суспензии магнитных частичек (восстановленное железо, чистое железо, кобальт, карбонильное железо, никель) размером порядка 1…20 мкм в жидкости-носителе. Носителем могут выступать различные жидкости, в зависимости от назначения устройства это могут быть: вода, кремнийорганическая (силиконовая) жидкость, синтетические и полусинтетические масла, минеральные масла и т.д. Под действием магнитного поля частицы, распределенные в объеме дисперсионной среды, образуют структуры, ориентированные вдоль силовых линий поля (МР-эффект) (рис. 18). При этом магнитное взаимодействие между частицами приводит к значительному изменению реологических свойств, поскольку образованные структуры препятствуют свободному перемещению суспензии и вызывают увеличение вязкости жидкости более чем в 100000 раз, что зависит от материала частиц дисперсной фазы, дисперсионной среды, размеров частиц и их объемной концентрации, а также других параметров. Благодаря этому эффекту МР

жидкости получили широкое распространение в полуактивных демпфирующих устройствах, тормозных системах и жидкостных захватах.

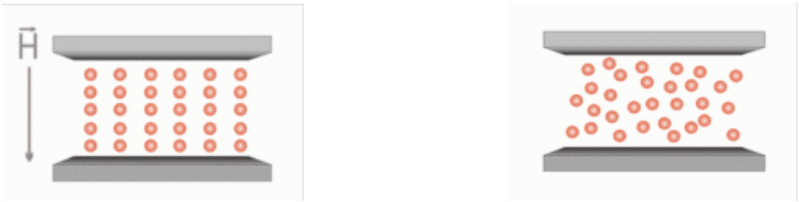
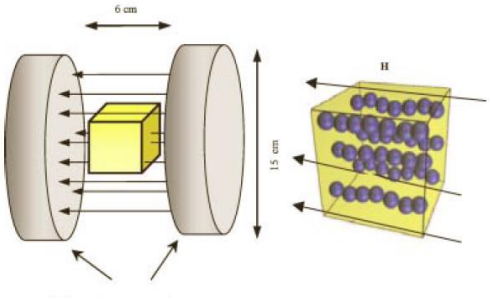


Рис. 18. МР-эффект [7]

МР-эластомеры включают в себя обширный класс материалов на основе самых различных вязкоупругих матриц, включая натуральные и синтетические резины, силикон, полиуретан и пр., с различной объемной долей порошкообразного магнитного наполнителя, находящегося внутри матрицы. Взаимодействие между матрицей и частицами наполнителя может быть различной силы, и это оказывает влияние на реологические и механические свойства композита. Структурно они могут рассматриваться как твердые аналоги магнитореологических жидкостей, поэтому физические явления, лежащие в основе полевой чувствительности свойств этих материалов, очень схожи.

Частицы внутри МР-эластомера могут быть распределены однородно или сгруппированы (например, в столбчатые структуры-цепочки). Для образования упорядоченной структуры во время изготовления композиции, содержащей магнитные частицы, прикладывается внешнее однородное магнитное поле. Под действием магнитного поля частицы наполнителя образуют столбчатые структуры-цепочки, которые в результате полимеризации оказываются зафиксированными в полимерной матрице. Такой тип обработки в процессе изготовления позволяет получить вязкоупругие материалы со специальными анизотропными свойствами.



полюса электромагнита

Рис. 19. Схема действия магнитореологического эластомера [5]

Когда эластомеры подвергаются воздействию внешнего магнитного поля, модуль упругости в определенном направлении материала будет изменяться в зависимости от напряженности приложенного магнитного поля и его направлении (в зависимости от внутреннего распределения частиц). Эти характеристики позволяют превратить материалы с изотропными свойствами в каждом направлении. Максимальное увеличение по модулю магнитореологических эластомеров составляет почти 0,6 МПа [5].

В МГТУ имени Н.Э. Баумана на кафедре МТ-11 разрабатываются механизмы точных перемещений и активной виброизоляции на основе указанных материалов.

3-х координатный гидравлический привод с магнитореологическим управлением с сильфонной герметизацией является механизмом параллельной кинематики и работает следующим образом. Подвижный составной шток 1 привода (рис. 20) перемещается относительно основания 4 за счет разности давлений, создаваемой МР-дросселями (МРД)

5 в гидроцилиндрах 2. МРД распределяют поток рабочей МР-жидкости, подаваемой насосной станцией 3, между гидроцилиндрами. Сильфонные узлы 6 обеспечивают герметизацию гидроцилиндров привода и, за счет своей разной жесткости в осевом и радиальном направлении, служат упругими направляющими подвижного штока. Работа МРД основана на изменении реологических свойств (вязкости, упругости, пластичности) жидкости в рабочем зазоре МРД при приложении магнитного поля [6].

Технические характеристики привода:

- рабочий ход - 10 мм;
- погрешность перемещения - 100 нм;
- постоянная времени - <200 мс;
- развиваемое усилие - >1000 Н.

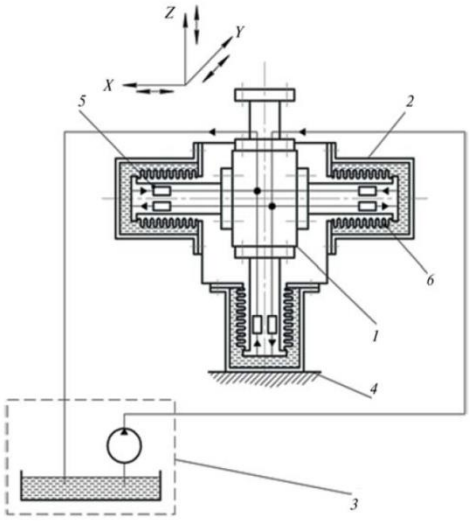


Рис. 20. Схема 3-хкоординатного гидравлического привода с МР управлением с сильфонной герметизацией [12]: 1-подвижный шток; 2-гидроцилиндры; 3-насосная станция; 4-неподвижное основание; 5-магнитореологические дроссел; 6-сильфонные узлы

Магнитореологический однокоординатный юстировочный модуль с герметизацией при помощи тонкостенных резиновых оболочек (ТРО) [6].

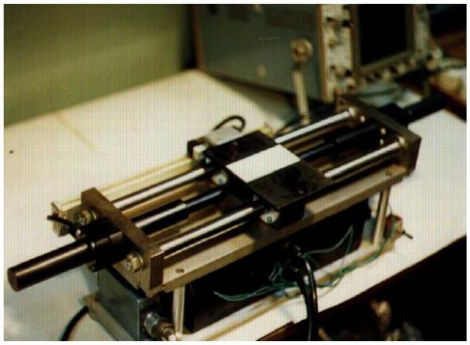


Рис. 21. Общий вид однокоординатного привода [6]

Однокоординатный привод (рис. 22) состоит из штока 1, закрепленного на каретке 2. Каретка перемещается по направляющим скольжения 4, в качестве элементов скольжения используются фторопластовые втулки 3. Концы штока расположены в гидроцилиндрах 5, в которых находится МР-жидкость, и уплотняются при помощи ТРО 6.

Рабочая жидкость подается с постоянным расходом через МРД 10 в гидроцилиндры 5 при помощи насосной станции. Давление рабочей жидкости на выходе насосной станции измеряется при помощи деформационного манометра.

При подаче управляющих сигналов на катушки МРД в зазорах дросселей наблюдается МР-эффект, происходит структурирование частиц карбонильного железа и увеличение динамической вязкости рабочей жидкости. Таким образом, пропускная способность дросселя уменьшается и в гидроцилиндрах привода создается перепад давлений, в результате которого возникает сила, действующая на каретку привода.

Технические характеристики привода:

- рабочий ход – 200 мм;
- погрешность перемещения –1000 нм;
- постоянная времени – <200 с;
- развиваемое усилие: >1000 Н

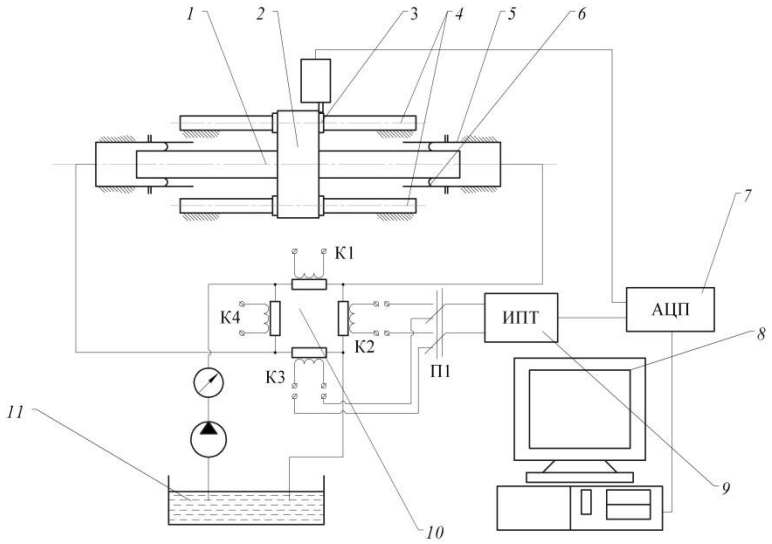


Рис. 22. Схема однокоординатного МР-привода: 1-шток; 2-каретка; 3-втулки; 4-направляющие; 5-гидроцилиндры; 6-ТРО; 7-блок АЦП; 8-ЭВМ; 9-источник постоянного тока (ИПТ); 10-магнитореологические дроссели; 11-насосная станция

Гидравлический МР-привод на основе гидростатической направляющей (рис. 23) содержит подвижную каретку 1, неподвижное основание 2, шток 3 с выполненными в нем четырьмя радиальными и двумя осевыми камерами высокого давления, три пары МРД 4, расположенные на входе в камеры высокого давления, сильфон 5, тонкостенную резиновую оболочку 6, упругий шарнир 7, объект 8 и датчик перемещения 9.

Модуль работает по принципу гидростатической направляющей следующим образом. Рабочая среда – МР-жидкость подается через входные МРД 4 в радиальные и осевые камеры высокого давления штока 3 и далее через рабочие зазоры между штоком и кареткой поступает на слив. Изменяя величину управляющего сигнала, подаваемого на МРД, можно регулировать давление рабочей жидкости в камерах высокого давления и перемещать каретку 1 по трем координатам X, Y, Z. Линейные перемещения каретки 1 по осям X и Y могут преобразовываться в угловые смещения объекта 8 вокруг упругого шарнира 7.

Технические характеристики привода:

- рабочий ход - 2 мм;
- погрешность перемещения - 50 нм;
- постоянная времени - 200 мс;
- развиваемое усилие - >1000 Н.

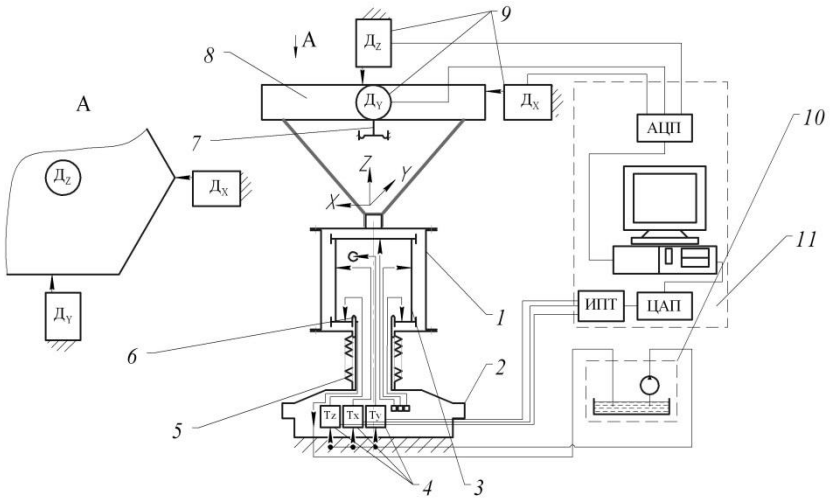


Рис. 23. Гидравлический МР-привод на основе гидростатической направляющей:
1-каретка; 2-основание; 3-шток; 4-МРД; 5- сильфон;
6-ТРО; 7-упругий шарнир; 8-объект; 9-датчики положения;
10-насосная станция; 11-система управления

Выводы

1. Существующие приводы не полностью удовлетворяют всему комплексу требований, предъявляемых системами точного позиционирования и виброизоляции. Поэтому для конкретного оборудования необходимо решать задачу выбора типа механизма и разработки его конструкции.

2. Устройства позиционирования на основе МР и ЭР материалов могут быть успешно применены для управления перемещением и виброизоляцией. За счет применения этих материалов можно исключить из конструкции устройств подвижных управляющих инерционных элементов с внешним трением, что позволяет существенно повысить точность (погрешность позиционирования 50-100 нм) и быстродействие (постоянная времени до 100 мс) микро- и нанопозиционирования. Также механизмы обладают всеми преимуществами гидравлического привода: высокой нагрузочной способностью и могут обеспечить качественную пассивную и полуактивную виброизоляцию.

Литература

1. *Damcos BRC 125* . б.д. http://www2.emersonprocess.com/en-US/brands/damcos/products/Valve-Remote-Control-Systems/Hydraulic-Acutators/brc/Pages/1_Damcos%20-%20BRC%20125.aspx (дата обращения: 16 декабрь 2013 г.).
2. Gilbertson, Roger G. *The 10 (or 11) Basic Ways.* Mondo-tronics, Inc. • RobotStore.com, 2004.
3. *Item # 5028, Thermal Actuator.* б.д. http://rostravernatherm.thomasnet.com/item/all-categories/thermal-actuators/pn-1014?assetid=g2 (дата обращения: 16 декабрь 2013 г.).
4. *M-272 Linear Drive for Automation.* б.д. http://www.physikinstrumente.com/en/products/prspecs.php?sortnr=1000650 (дата обращения: 16 декабрь 2013 г.).
5. *Magneto Rheological Elastomers.* б.д. http://www.ioniqa.com/magneto-rheological-elastomers/ (дата обращения: 16 декабрь 2013 г.).
6. Анисимов В.В., Деулин Е.А., Михайлов В.П. *New high precision magnetic drives.* М: BMSTU, б.д.

7. Базиненков А. М., Добер В. А., Михайлов В. П. *«Исследования свойств магнитореологических жидкостей и их использования в устройствах перемещения и виброизоляции.»* Наука и образование, 2012.
8. Богданов К.Ю. *ЧТО МОГУТ НАНОТЕХНОЛОГИИ.* б.д. http://kbogdanov5.narod.ru/index.htm (дата обращения: 13 декабрь 2013 г.).
9. *Гидравлический привод.* б.д. http://ru.wikipedia.org/wiki/Гидравлический_привод (дата обращения: 15 декабрь 2013 г.).
10. *Привод.* б.д. http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%B2%D0%BE%D0%B4 (дата обращения: 16 декабрь 2013 г.).
11. *Электрический привод.* б.д. http://ru.wikipedia.org/wiki/Электрический_привод (дата обращения: 15 декабрь 2013 г.).

УДК 621.3.078.4

ВАКУУМНАЯ НАПЫЛИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА С ДИСТАНЦИОННЫМ ДОСТУПОМ

Максим Владимирович Кардашин,
студент 5 курса,
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: В.Т. Рябов,
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Вакуумное напыление тонких пленок – это процесс нанесения пленок или слоев на поверхность деталей или изделий в условиях вакуума. Методами вакуумного напыления наносят металлы (Al, Au, Cu, Cr, Ni, V, Ti и другие), химические соединения (силициды, оксиды, бориды, карбиды), керметы. К примеру твердые карбидные, нитридные, на режущий инструмент из цементированных и легированных сталей (сверла, фрезы, развертки, втулки и проч.) и на формующий инструмент (матрицы, пуансоны и т.п.). Эти керамические составы предотвращают абразивный износ, который обычно имеет место при контакте металл-металл. В результате, время жизни резца увеличивается до 10 раз и скорости резания, которые непосредственно влияют на производительность, также значительно возрастают. Нанесение таких покрытий, в том числе, металлизация металлов твердыми сплавами поверхностей трения, также значительно увеличивают износостойкость деталей, особенно в подшипниках скольжения, ползунах и прочих скользящих элементах механизмов и машин. С использованием именно методов вакуумного напыления поверхностей трущихся пар, работающих в условиях фрикционного контакта, связано и бурно развивающееся в настоящее время направление получения нанокомпозитных материалов и покрытий. Они позволяют создавать совершенно новые материалы с более высокими, подчас уникальными, свойствами, которые произвести другими методами просто невозможно. Эти материалы особенно востребованы в самолетостроении и связанном с ним агрегатостроении, где, во многих случаях, традиционные материалы и технологии их получения исчерпали возможности улучшения своих свойств. Поэтому необходимо оборудование в учебном процессе на котором можно наглядно продемонстрировать какими способами можно получать тонкие пленки.

Для этого была разработана установка для вакуумного напыления (УВН-1) , она используется для наглядного проведения лабораторных работ по нанесению тонких

пленок, для практических работ в рамках конструкторско-технологического практикума и для лабораторных работ по курсу «Системы автоматического управления». Благодаря использованию модульных фланцев установка позволяет производить напыление различными методами: магнетронным, термическим испарением, дуговым. Отличительная черта УВН-1 - её полная автоматизация и дистанционный доступ к установке с любого компьютера.

На рис. 1. показана фотография установки, на которой указаны ее основные узлы. На нижнем фланце вакуумной камеры 1 расположен испаритель, на верхнем фланце – модуль подложки, на которую и производится напыление. Компьютер 2 выполняет функции центрального контроллера и организует человеко-машинный интерфейс. Под номером 3 выделены сразу 2 узла: высоковакуумный турбомолекулярный насос внизу и клапан - «бабочка» вверху. Клапан нужен для защиты насоса в случае аварийного отключения и для того, чтобы изменять быстроту откачки, тем самым регулируя давление в камере.

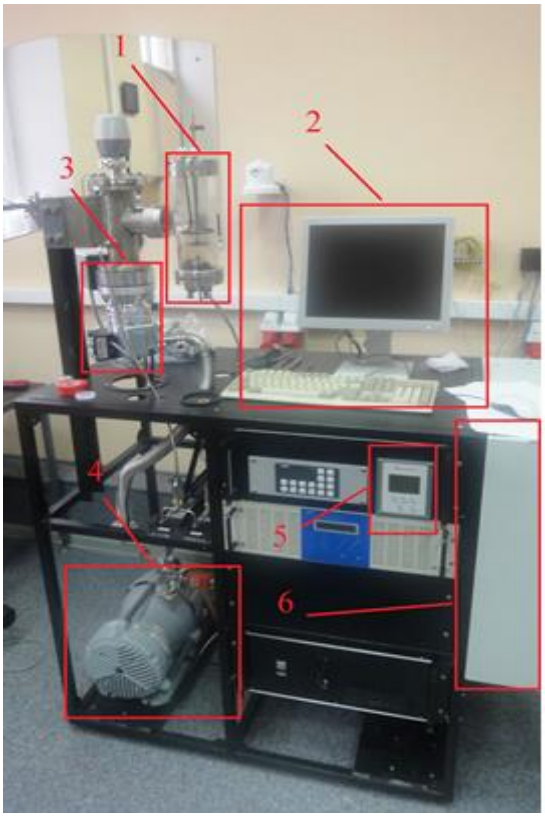


Рис. 1 Внешний вид установки УВН-1

Форвакуумный насос 4 создает предварительный вакуум, достаточный для запуска турбомолекулярного насоса. Контроллер 5 турбомолекулярного насоса управляет плавным включением, работой и выключением насоса, так как этот насос является очень высокотехнологичным устройством и количество оборотов его лопастей может достигать 40000 об/мин. Еще к контролеру подключаются вакуумметры, отслеживающие давление в системе. В установке стоит два вакуумметра: для низкого и глубокого вакуума. Шкаф 6 с системой энергообеспечения и управления показан на рис.2.

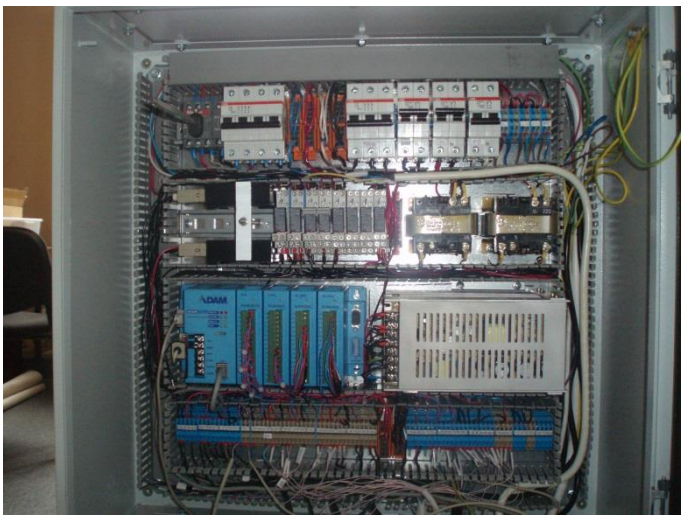


Рис. 2. Система энергообеспечения и управления

В шкафу размещены рубильник, автоматические выключатели, нужные для включения - отключения элементов оборудования, а также для их защиты от скачков напряжения, реле и клеммники, коммутирующие устройства между собой. Блок питания обеспечивает установку постоянным током. Выделяется программируемый логический контроллер, задача которого управлять оборудованием УВН-1 в «жестком» реальном времени, более подробно принцип работы которого мы опишем далее. Остались не пронумерованы, либо не отображены на рисунках вакуумный и газовый трубопроводы, газовые баллоны, пропорциональные клапаны.

На рис.3 приведена функциональная схема установки. На этой схеме отображены трубопроводы, вакуумное оборудование, а так же устройства управления, то есть весь спектр техники. Центральную роль здесь играет программируемый логический контроллер PLC, так как именно он дает команды конечным устройствам на выполнение каких- либо действий, а также снимает показания со всех датчиков. Данный контроллер имеет возможность подключения к локальной сети, что позволяет использовать установку, находясь в любой точке земного шара с доступом к интернету. А также это означает, что мы не привязаны к конкретному компьютеру, позволяя при поломке компьютера оперативно восстановить работоспособность установки.

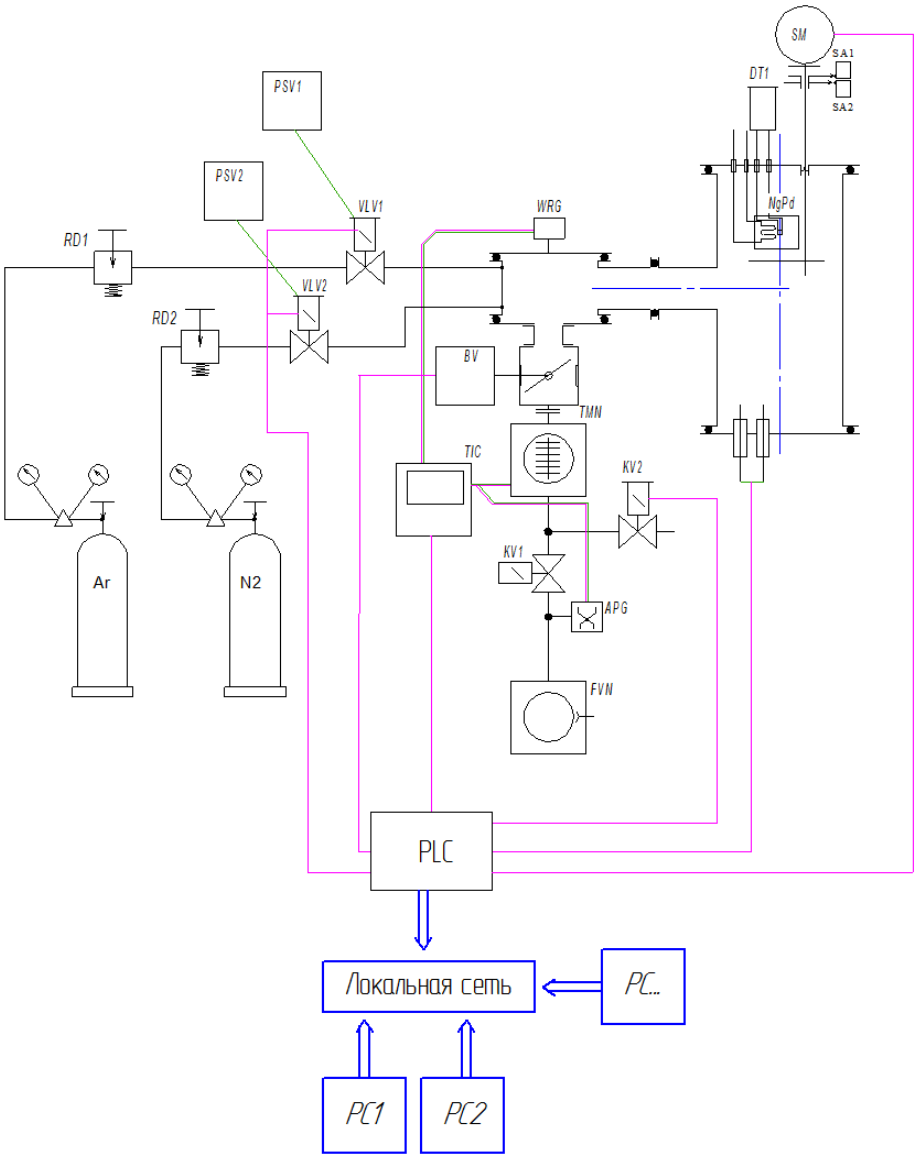


Рис. 3. Функциональная схема

Так как главной отличительной чертой УВН-1 является её полная автоматизация, следует подробнее рассказать про устройства управления. К ним относятся: персональный компьютер, программируемый логический контроллер ADAM 5510, контроллер турбомолекулярного насоса TIC фирмы Edwards, блок управления клапаном - «бабочкой». У каждого контролера своя функция, для которой он предназначен. Персональный компьютер организует человеко-машинный интерфейс, служит для ввода команд оператора, вывода и обработки информации с установки. Логический контроллер ADAM 5510 необходим для управления другими локальными контроллерами, управления релейными связями, получения и обработки информации получаемой от датчиков и персонального компьютера. К локальным контролерам можно отнести: контролер турбомолекулярного насоса, который нужен для плавного запуска, остановки насоса, считывания давления с вакуумметров, на случай аварийного отключения питания, контролер клапана необходимый, чтобы реализовать возможность управления клапаном. Иерархия сети установки показана на рис. 4.

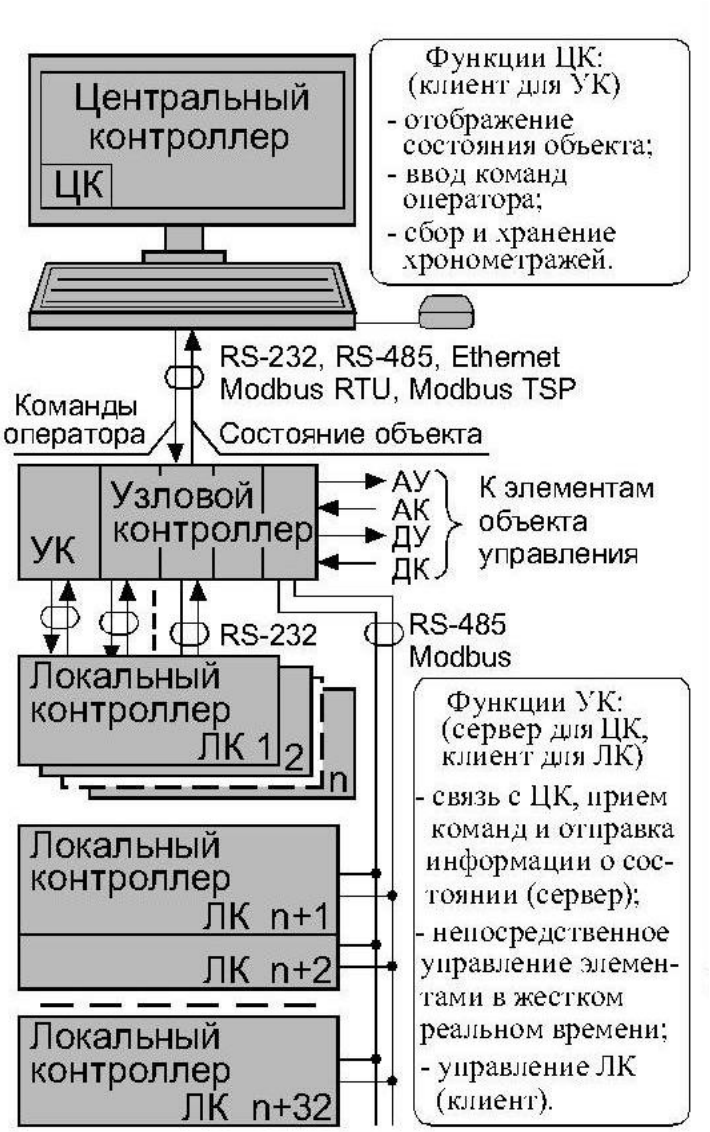


Рис. 4. Информационно-управляющая сеть установки вакуумного напыления

Управление процессами может осуществляться либо через любой персональный компьютер с специальным программным обеспечением. Весь обмен данными производится по протоколу Modbus/TCP. Протокол Modbus работает, используя клиент-серверную модель, основанную на транзакциях, состоящих из запроса и ответа. В сети есть только одно главное устройство, и несколько подчиненных устройств. Главное устройство инициирует транзакции (передаёт запросы) и может адресовать запрос индивидуально любому подчиненному или инициировать передачу широковещательного сообщения для всех подчиненных устройств. Подчинённое устройство, опознав свой адрес, отвечает на запрос, адресованный именно ему. При получении широковещательного запроса ответ подчинёнными устройствами не формируется.

В случае с установкой УВН-1 узловой контроллер ADAM 5510 обменивается с персональным компьютером «общей» памятью ShareMem (массивом из 32 шестнадцатиразрядных двоичных слов). Данная память условно разделена на 2 части. В первую половину памяти информация записывается контроллером и считывается компьютером. Эта информация включает данные с локальных контроллеров: клапана - «бабочки», вакуумметров APG и WRG, контроллера турбомолекулярного насоса. Во вторую половину записываются команды с компьютера и дополняющие их параметры. Они считываются узловым контроллером и отправляются на локальные.

Программное обеспечение для центрального компьютера было написано в среде Delphi на языка Pascal. Оно работает в операционной среде общего назначения Windows XP, Windows 7 или 8.. Программное обеспечение узлового контроллера ADAM 5510 написано на C+, работает в среде FleshDOS и в жестком реальном времени контролирует объекты управления. При доработке программного обеспечения установки необходимо вносить изменения в обе программы. На рис. 5 показано главное окно программы центрального контроллера.

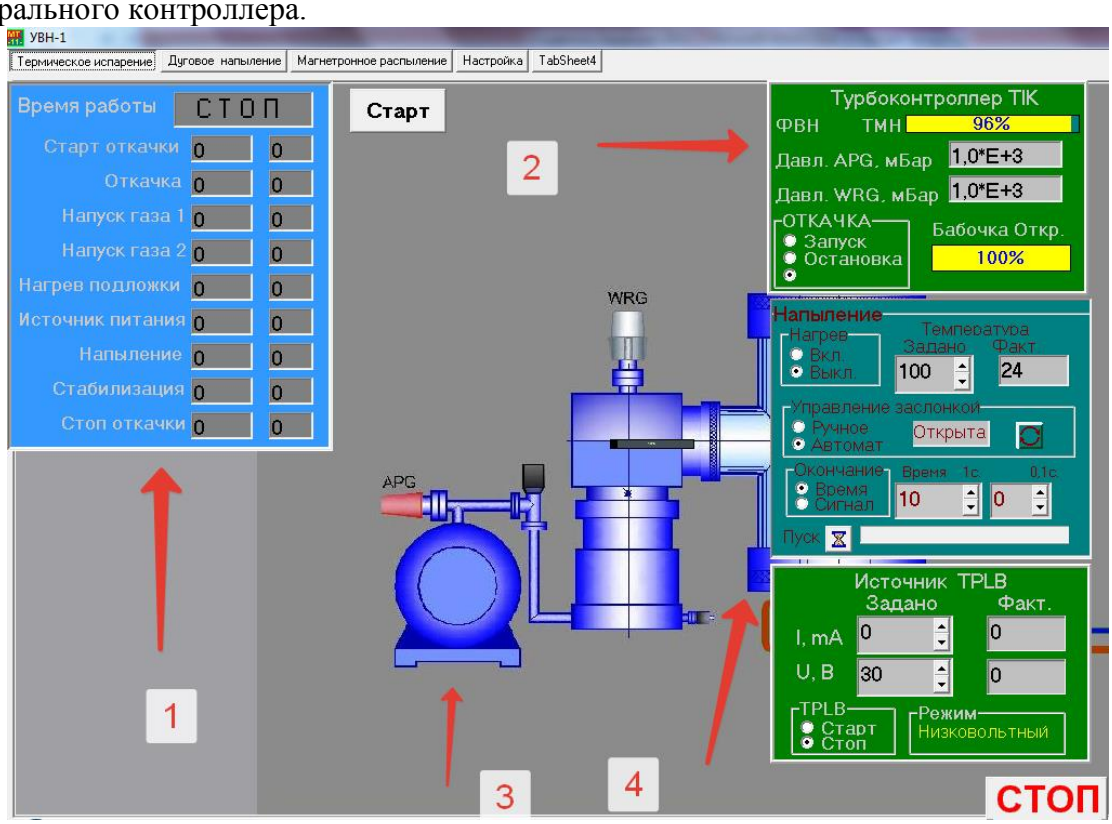


Рис. 5. Окно программы управления УВН-1

Программа позволяет управлять термическим, магнетронным, дуговым напылением, вверху программы можно увидеть переключатели для каждого режима. Стрелка 1 показывает какой процесс запущен сколько он длится по времени. По стрелке 2 можно увидеть какой насос работает и какое давление в вакуумной системе. Стрелка 3 показывает на вакуумную схему установки. По стрелке 4 можно увидеть, какие параметры можно регулировать при термическом испарении.

Также средствами программного обеспечения персонального компьютера записывается файл истории для последующей обработки полученных данных. Весь хронометраж работы записывается в типизированный файл Hstr№.hst. Причины этому две: скорость записи и объем рабочего файла.

В начале работы программа проверяет номер файла в специальном текстовом файле, после чего перезаписывает этот файл, прибавляя к считанному числу единицу. Далее программа проверяет, существует ли файл истории с таким именем, если есть- перезаписывает, а если нет, то создает файл с таким именем. После этого при работе в этот файл записывается «общая» память контроллера и ПК. Долгое время отсутствие программы для расшифровки не позволяло получать информацию из файла истории для последующей обработки. А ведь эта информация очень важна: можно получать точные зависимости одной переменной от другой, контролировать работу других операторов. В данном файле содержится подробный «лог» работы системы, содержащий около 30 параметров.

Была разработана программа для обработки, отображения и конвертации файла истории. Все эти функции компактно разместились на главном экране программы (рис.6).

Для начала работы нужно открыть файл. Чтобы упростить поиск файла истории в окне открытия файла отображаются только файлы с расширением hst (рис.6).

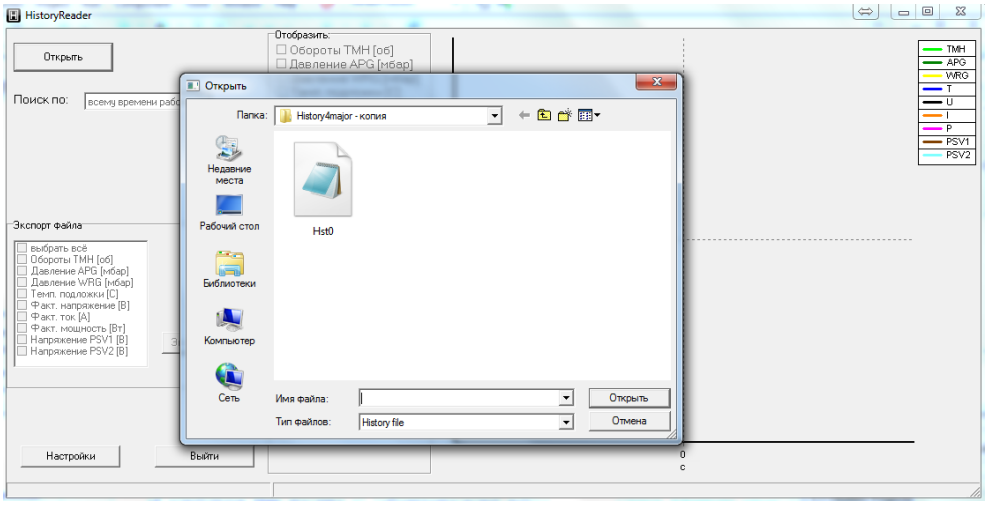


Рис. 6. Главное окно программы

После открытия файла внизу показывается путь и имя открытого файла, чтобы знать какой файл открыть. Также внизу указана длительность записанного файла истории. Можно отсеивать в файле отрезки времени по какому либо параметру, то есть например: можно смотреть какое давление была в системе в тот момент, когда пропорциональный клапан был открыт на заданное значение и так далее. Также в основном окне можно просматривать графики различных параметров, меняющихся во времени.

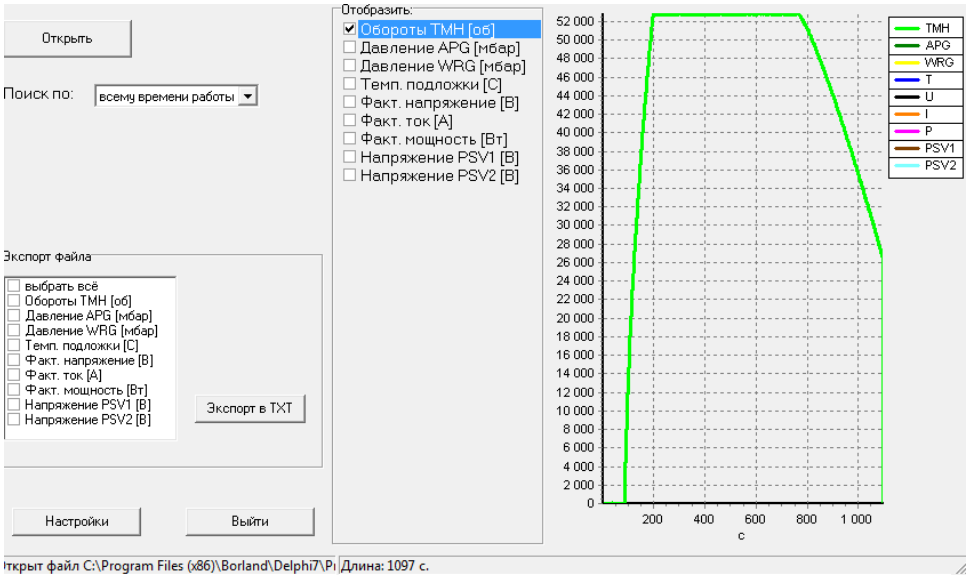
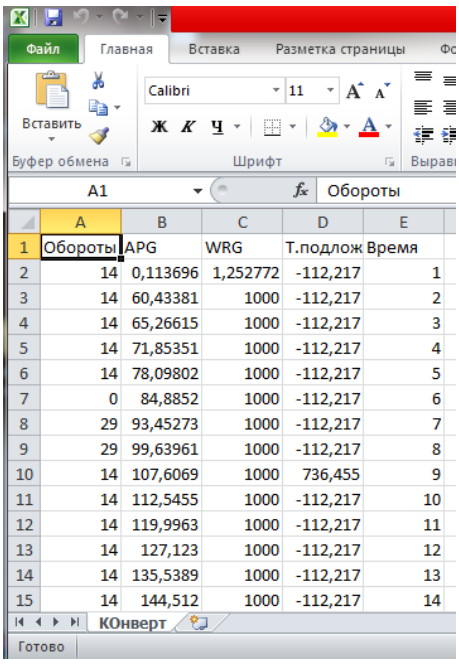


Рис. 7. Главное окно программы

После открытия файла (рис. 7) можно выбрать, что конвертировать в текстовый файл, используя пункт «Экспорт файла». Из этих данных можно получить константы для PID контроллера, зависимости одних параметров от других (к примеру, давление от потока на пропорциональном клапане).



	A	B	C	D	E
1	Обороты	APG	WRG	T.подлож	Время
2	14	0,113696	1,252772	-112,217	1
3	14	60,43381	1000	-112,217	2
4	14	65,26615	1000	-112,217	3
5	14	71,85351	1000	-112,217	4
6	14	78,09802	1000	-112,217	5
7	0	84,8852	1000	-112,217	6
8	29	93,45273	1000	-112,217	7
9	29	99,63961	1000	-112,217	8
10	14	107,6069	1000	736,455	9
11	14	112,5455	1000	-112,217	10
12	14	119,9963	1000	-112,217	11
13	14	127,123	1000	-112,217	12
14	14	135,5389	1000	-112,217	13
15	14	144,512	1000	-112,217	14

Рис. 8 Файл истории в Excel

Использование программы дает большие возможности по работе с файлом, в дальнейшем программа будет совершенствоваться, оптимизироваться, при необходимости будут добавлены новые функции.

УДК 621.3.049.75

Особенности технологического процесса изготовлениямногослойных печатных плат с усиленным теплоотводом

Алексей Александрович Бушмаков,
студент 4 курса,
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»,
Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Ю.С. Боброва,
ассистент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Введение

Разработчик при проектировании радиоэлектронных устройств стремится снизить их массогабаритные характеристики. При этом компактная упаковка тепловыделяющих элементов на плате не позволяет эффективно рассеивать выделяемое ими тепло, получающееся за счет того, что не вся потребляемая мощность переходит в полезную. Нарушение теплового режима электронных компонентов влечет за собой снижение надежности, помехоустойчивости, а также выход из строя компонентов. Все это делает необходимость отвода тепла от радиоэлектронных компонентов актуальной задачей, требующей расширения базы типовых технологических приемов в соответствии с требованиями разработчиков радиоэлектронных устройств.

Конструкции печатных плат с усиленным теплоотводом

Типовая многослойная печатная плата (далее – МПП) представляет собой объединенные посредством прессования диэлектрические слои, на которых сформированы проводники электрической цепи.

Отвод тепла от печатных плат можно выполнить несколькими способами, рассмотрим некоторые из них.

Наиболее распространенный на данный момент – охлаждение источника тепла напрямую (рис. 1). Теплоотводящий элемент в таких платах может быть представлен в виде радиатора, вентилятора, трубок с циркулирующей в них жидкостью или их сочетанием. Теплоотводящий элемент присоединяется к источнику тепла через специальный изоляционный материал с высокой теплопроводностью. Основным недостатком такого способа охлаждения является большие габаритные размеры теплоотводящего элемента.

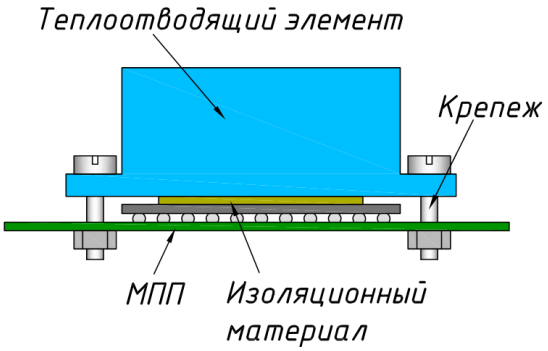


Рис. 1. Конструкция платы с отводом тепла напрямую

Также отводить тепло можно с помощью гипертеплопроводящего (далее – ГТП) пористого основания. ГТП основание представляет собой плоскую тонкую герметичную конструкцию, содержащую пористый материал – фитиль, заполненный жидким рабочим веществом – теплоносителем (аммиак, вода и т.п.). В фитиле имеются каналы для переноса пара (рис. 2). Перенос тепла вдоль панели осуществляется в результате движения рабочего вещества (в виде пара) по каналам от области нагрева к области охлаждения и обратно – в виде жидкости по фитилю. Недостатком такой конструкции является также большие габаритные размеры и невозможность изменить форму основания.

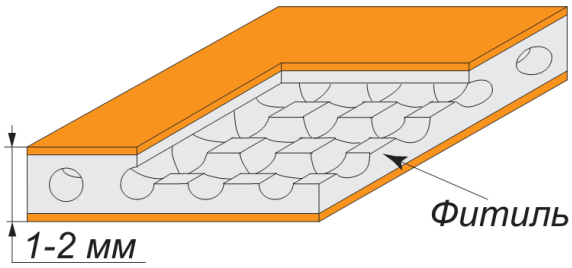


Рис. 2. Конструкция ГТП основания

В качестве основания для плат также можно использовать металлы с высокой теплопроводностью, например алюминий, медь. Теплопроводность алюминия 237 Вт/(м·К), а у меди 380 Вт/(м·К). Не смотря на это, чаще используют алюминий, так как он дешевле. На рис. 3 изображена конструкция однослойной печатной платы с металлическим основанием, такие платы можно разделить на 3 вида: односторонние, двухсторонние и многослойные.

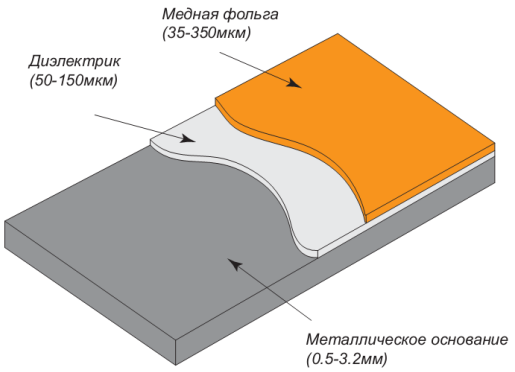


Рис. 3. Однослойная печатная плата с металлическим основанием

Базовым материалом таких плат служит металлическое основание, на которое накатана медная фольга толщиной 35–350 мкм через изолирующий теплопроводный препрег.

Если плата подвергается большим механическим нагрузкам, то в качестве материала основания целесообразнее использовать стальное основание, но при этом необходимо учитывать, что его теплопроводность примерно в 4 раза ниже теплопроводности алюминия. Также при проектировании таких плат следует обратить внимание на то, что в данном случае применяется электропроводящее основание, что делает невозможным использование элементов, монтируемых в отверстия. На данных платах можно использовать только элементы поверхностного монтажа. Отверстия же могут использоваться только для крепежа.

На рис. 4 изображена двухсторонняя плата с металлическим сердечником. В таких платах в отличие от однослойных можно использовать элементы, монтируемые в отверстия.

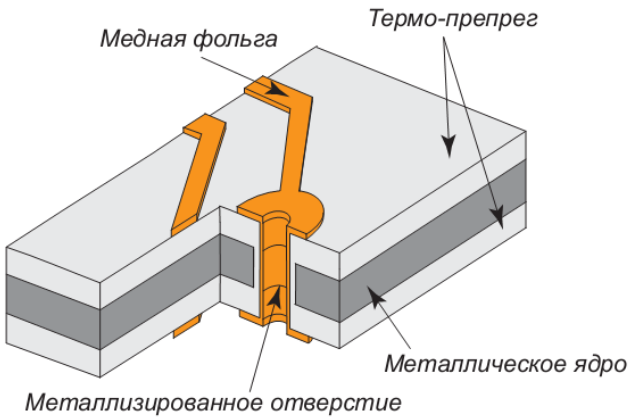


Рис. 4. Двухсторонняя плата с металлическим сердечником

МПП также можно изготовить на металлическом основании. Рассмотрим на примере четырехслойной печатной платы(см. рис. 5). Такие платы изготавливаются в два этапа: вначале изготавливается МПП, затем она напрессовывается на металлическое основание через теплопроводящий изоляционный слой. Трассировка в таких платах может занимать все слои. Причем, следует обратить внимание на то, что те слои, в которых наибольшее выделение тепла следует располагать ближе к металлическому основанию.

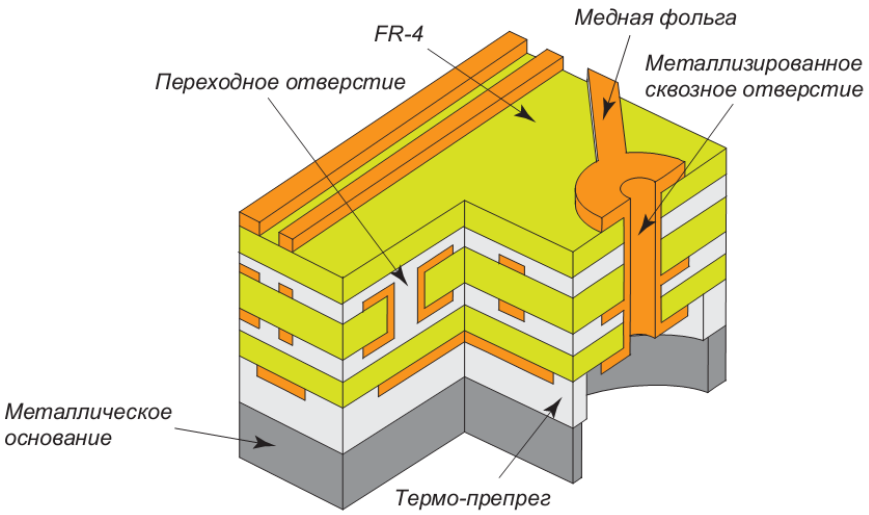


Рис. 5. Четырехслойная печатная плата с металлическим основанием

У таких МПП из-за электропроводящего основания исчезает возможность использования элементов, монтируемых в отверстия. Чтобы избавится от этого недостатка необходимо, чтобы металлическое основание не проводило электричество или было изолировано. Изолировать алюминиевое основание можно с помощью его анодирования. При анодировании на всех поверхностях алюминия образуется оксид Al_2O_3.

Таким образом, для установки элементов, монтируемых в отверстия, необходимо перед операцией прессования МПП с алюминиевым основанием в местах установки элементов, монтируемых в отверстия, просверлить отверстия и после провести анодирование поверхности.

Еще один вариант конструкции МПП с алюминиевым основанием изображен на рис. 6.

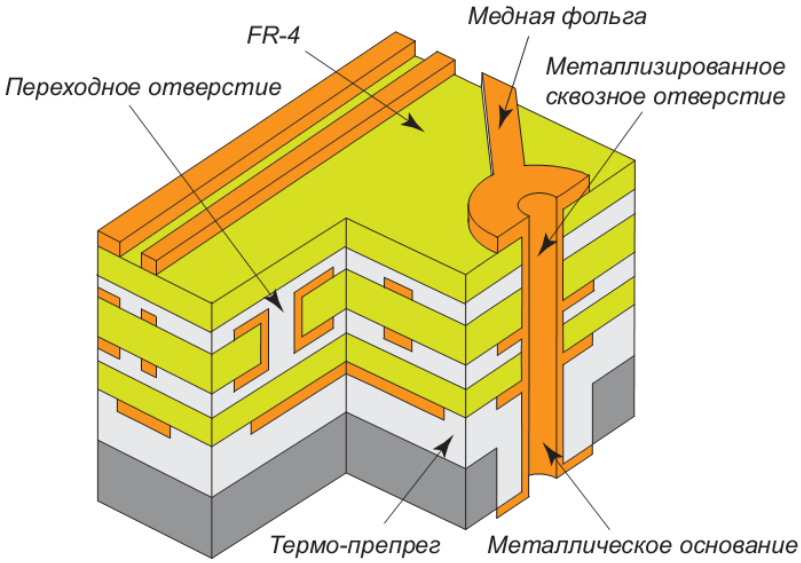


Рис. 6. Четырехслойная печатная плата с металлическим основанием

Преимуществом такой конструкции является возможность использования среднетекучего препрега. Но в отличие от предыдущей конструкции операция прессования здесь не является заключительной. После нее еще необходимо просверлить и металлизировать сквозные отверстия, а также сформировать проводящий рисунок на наружном слое МПП.

Проблему изолирования металлического основания также можно решить, использовав металлический сердечник (см. рис. 7)

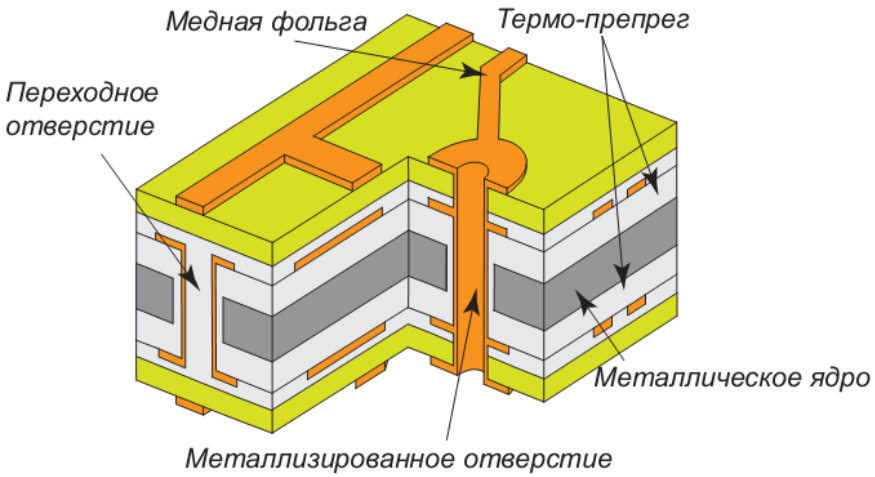


Рис. 7. Четырехслойная печатная плата с металлическим сердечником

Материалы МПП с усиленным теплоотводом

Материал металлического основания МПП должен обладать высокой теплопроводностью. Наиболее теплопроводным является медное основание, но из-за высокой стоимости меди чаще применяют алюминий. Для придания дополнительной жесткости конструкции обычно применяют стальное основание. Основные параметры материалов для печатных плат приведены в таблице 1.

Таблица 1. Материалы металлического основания

Параметры	Низкоуглеродистая сталь	Серебро	Медь	Алюминий	Ковар	Инвар
Коэффициент термического расширения, $\alpha \cdot 10^{-6}$ 1/К	11	19,2	16,8	23,2	4,5-5,2	0,62-5.3
Теплопроводность, Вт/(м·К)	52-54	429	380-401	140-240	19	12,7
Плотность, г/см^3	7,7	10,5	8,9	2,7	8,35	8,13

Подбор теплопроводящего изоляционного материала

Для того чтобы металлическое основание эффективно передавала тепло от МПП, необходимо подобрать изоляционный материал с высокой теплопроводностью. Также очень важным параметром такого материала служит текучесть. Контролировать этот параметр необходимо в связи с тем, что при прессовании препрег может попасть в отверстия для выводов штырьевых элементов.

Основные материалы, с помощьюкоторых можно скрепить МПП с металлическим основанием – это препрег и клеевое соединение.

Таблица 2. Препреги с высокой теплопроводностью

Препрег	Содержание смолы,%	Диэлектрическая постоянная	Теплопроводность Вт/(м·К)	Коэффициент термического расширения, 10^{-6} 1/К
Arlon92ML	85-90	5,2(1МГц)	2(z)/3.5(x, y)	19-20
Arlon 91ML	80-90	5.5 (1 МГц)	1(z)/1.9(x, y)	23

Bergquist ThermalClad HT	80-90	7	4.1	25
Isola	80-90	3.96(100 МГц)	0.5	11
Rogers COOLSPAN ® TECA	85	3,5 (100 МГц)	6	45
RO4450F	80-90	3.52(100 МГц)	0.65	17-19

Из таблицы 2 видно, что на сегодня наилучший показатель теплопроводности показывает препрег фирмы Rogers [1], но, несмотря на это, материал не подходит так, как коэффициент термического расширения диэлектрика сильно отличается от коэффициента алюминия. В многослойных печатных платах с металлическим основанием рациональнее использовать препреги фирм Arlon [2] и Bergquist [3]. Но такие препреги подойдут только к МПП, у которых нет элементов, монтируемых в отверстия. Это связано с тем, что при прессовании из-за высокой текучести этих материалов, отверстия для монтажа компонентов заполняются смолой. Поэтому для таких плат необходимо использовать низкотекучие препреги (см. табл. 3).

Таблица 3. Низкотекучие препреги

Препрег	**Содержание смолы,%**	**Диэлектрическая постоянная**	**Теплопроводность Вт/(м·К)**	**Коэффициент термического расширения, 10^{-6} 1/К**
Arlon 49N	65-72	4.4(1 MHz)	0.25	14-16
Isola FR406	65	4.3(1MHz)	0.3	17-20
Taconic FastRise 77	62-65	7.85(500MHz)	0.43	10-17

Технологический процесс прессования

Процесс прессования МПП с металлическим основанием можно разделить на два этапа. Первый этап – подготовительный, на котором происходит сборка пакета МПП из металлического основания, МПП и листа препрега (см. рис. 8). На втором этапе происходит прессование одновременно нескольких пакетов в заготовки МПП. Тщательность выполнения норм технологических операций на этих этапах во многом определяет качество самих плат. Следует обратить внимание на то, что комплектовать пакеты МПП необходимо таким образом, чтобы металлические основания в разных пакетах МПП располагались симметрично относительно центра набора этих пакетов. Причем если прессование производится в прессах с горячими плитами то, металлические основания МПП следует расположить со стороны плит.

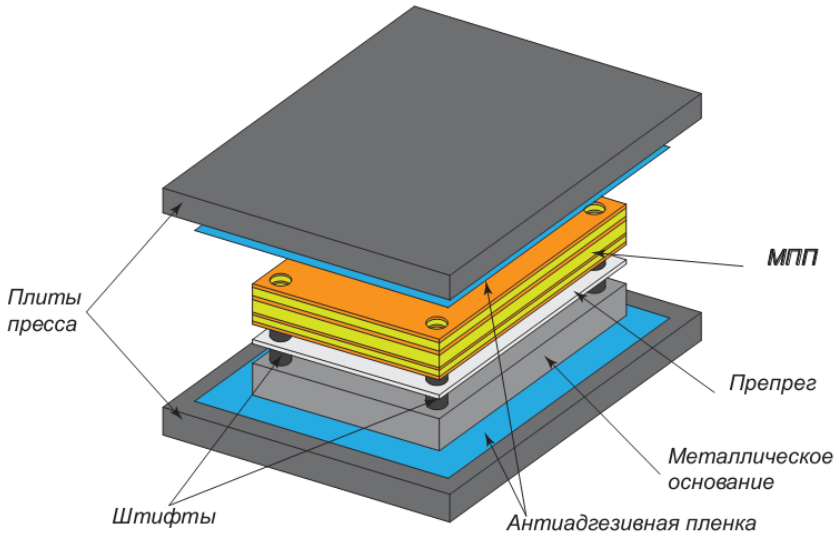


Рис. 8 Сборка пакета МПП с металлическим основанием

Собранные на первом (подготовительном) этапе пакеты МПП, переложенные прокладочным материалом, помещаются между плитами пресса. Камера пресса герметична и сам техпроцесс прессования происходит после откачки воздуха из нее. Давление воздуха в камере прессования современных прессов составляет менее 0,1 атмосферного. Такая глубина вакуума дает сразу несколько положительных эффектов. Во-первых, из препрега интенсивно улетучиваются остатки растворителя эпоксидной смолы, которые могут привести к образованию газовых пустот в структуре платы во время прессования. Во-вторых, во время прессования между элементами печатного рисунка будет очень мало воздуха, что приведет к качественному заполнению этих промежутков эпоксидной смолой [4].

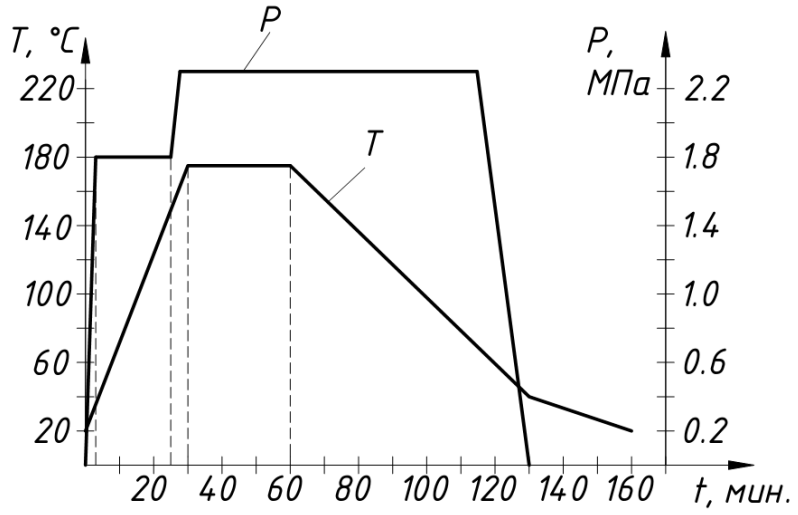


Рис. 9. Цикл прессования МПП

В начале цикла (см. рис. 9), когда температура в камере только растет, плиты пресса сжимаются с малым усилием ~1.8 МПа. После дегазации камеры и достижения в пакетах заготовок необходимой температуры (называемой температурой гелеобразования) препрег приобретает текучесть, и создается полное усилие прессования ~2.3 МПа. После этого производится выдержка в течение ~30 мин., необходимая для отверждения эпоксидной смолы. После отверждения температура в камере постепенно снижается, и опускается давление.

Заключение

Результаты анализа возможных конструкций МПП с усиленным теплоотводом позволяют сделать вывод о целесообразности реализации конструкции МПП на металлическом основании в силу её технологичности, мобильности и универсальности с точки зрения габаритов и формы.

Для изготовления специальных многослойных плат на металлическом основании, предусматривающих монтаж компонентов в отверстия, предлагается разработанная технология прессования МПП через низкотекучий препрег на анодированное алюминиевое основание с предварительно сформированными отверстиями под монтаж компонентов.

Литература

1. Информационные материалы фирмы Rogers – www.rogerscorp.com
2. Информационные материалы фирмы Arlon – www.arlon-med.com
3. Информационные материалы фирмы Bergquist – www.bergquistcompany.com
4. И. Барановский. Современный дизайн и технологии печатных плат: вопрос-ответ Разработка стека сложных многослойных печатных плат. Особенности формирования стека с учетом контроля импеданса проводников// CHIP NEWS Украина, № 6 (86), август, 2009. – 2-8 с.
5. Информационные материалы фирмы TACONIC – www.taconic-add.com
6. Информационные материалы фирмы Isola - www.isola-group.com
7. Ю. Муравьев. Особенности проектирования и производства печатных плат на металлическом основании//Производство электроники: технологии, оборудование, материалы, №2, 2010. – 35-38 с.

УДК 621.389

УМЕНЬШЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОДЛОЖЕК AlN ИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ

Алина Александровна Доброносова[(1)], Юлия Сергеевна Макарова[(1)], Денис Дмитриевич Васильев[(2)]

Студент 3 курса [(1)], студент 5 курса,[(2)],
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: К.М. Моисеев,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Введение

Керамические подложки нитрида алюминия AlN получают спеканием порошка нитрида алюминия при температурах, близких к температуре плавления. AlN является уникальным техническим керамическим материалом, который обладает интересным сочетанием высокой теплопроводности и изоляционных свойств. Так как коэффициенты температурного линейного расширения (КТЛР) у нитрида алюминия и кремния практически идентичны, то это позволяет использовать его как конструкционный материал в области электронных технологий, где ранее интенсивно использовалась окись бериллия, физические свойства которой уступают AlN, за исключением диэлектрических потерь, но относительно низкая стоимость и преобладание других характеристик, позволяют нитриду алюминия занять лидирующие позиции на мировом рынке керамики

[1]. Особенно активно в последнее время применяются в производстве корпусов, подложек интегральных схем, транзисторов и многих других электронных компонентов [1].

Таблица 1.Сравнение характеристик AlN и BeO.

Параметр	AlN	BeO
Теплопроводность, Вт/м ·К	200-240	220-240
Прочность на изгиб, МПа	250-300	170-230
Электрическая прочность, кВ/мм	14-18	10
Удельное электросопротивление (при 25), Ом	$>10^{12}$	$>10^{11}$
Диэлектрическая постоянная (при 1 МГц)	9	8
Тангенс угла диэлектрических потерь:		
при 1 МГц	$1\cdot10^{-4}$	$1\cdot10^{-4}$
при 10 МГц	$5\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-4}$
Коэффициент температурного линейного расширения (25°С), 10^{-6}/°С	4,6	7,8
Плотность, г/см^3	3,26	2,9

Одной из важнейших характеристик подложки, на которую будет осаждаться тонкопленочное покрытие, является её шероховатость. Достаточно высокие значения шероховатости нитрида алюминия влияют на множества факторов. При более шероховатой поверхности ухудшается четкость рельефа металлических проводников и, следовательно, точность воспроизведения рисунка схемы. При шероховатой поверхности подложки может произойти локальный разрыв высокоомных (узких) проводников. Не менее опасно нанесение на грубо обработанную поверхность двух близко расположенных проводников между которыми может произойти короткое замыкание. Таким образом, чем лучше качество обработки поверхности подложки, тем выше «разрешающая способность» схемы [2].

Таблица 2.Классы точности поверхности.

Класс шероховатости	**Ra предпочт., мкм**	**Ra допустимые, мкм**	**Rz, мкм**
7	0,80	1,25; 1,00; 0,63	6,3; 5,0, 4,0; 3,2
8	0,40	0,63; 0,50; 0,32	3,2; 2,5; 2,0; 1,60
9	0,20	0,32; 0,25; 0,160	1,60; 1,25; 1,00; 0,80
10	0,10	0,160; 0,125; 0,080	0,80; 0,63; 0,50; 0,40
11	0,050	0,080; 0,063; 0,040	0,40; 0,32; 0,25; 0,20
12	0,025	0,040; 0,032; 0,020	0,20; 0,16; 0,125; 0,100
13	0,012	0,020; 0,016; 0,010	0,100; 0,080; 0,063; 0,050
14	0,012	0,010; 0,008	0,050; 0,040; 0,032

В данной работе рассмотрен процесс обработки подложек нитрида алюминия автономным источником ионов сеточного типа. И представлены результаты измерений структуры поверхности в сканирующем зондовом микроскопе.

Установка и условия проведения эксперимента

Исследование топологии подложки AlN до и после травления проводится на модуле сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), измерительного комплекса Ntegra Spectra (рис. 1) в режиме «полуконтактной» атомно-силовой микроскопии (АСМ).

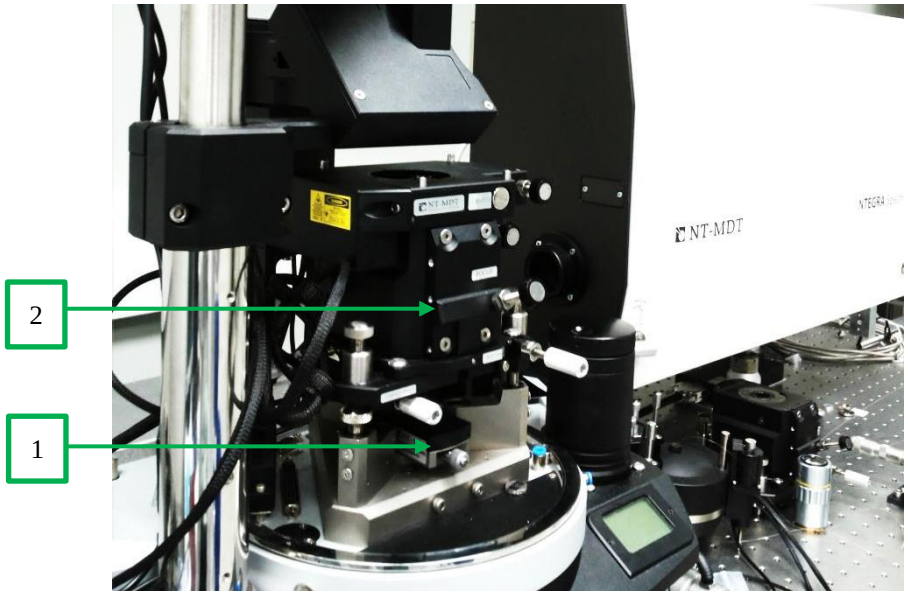


Рис. 1. Общий вид измерительного комплекса Ntegra Spectra

Прибор состоит из основания 1, и зафиксированной на нем измерительной головки 2. На измерительной головке расположены держатель зонда с зондом, лазер и фотодиод. В основании прибора расположены сканер с держателем образца, система подвода образца к зонду и система позиционирования образца.

В микроскопе Ntegra Spectra, сканирование осуществляется образцом, в то время как зонд остается неподвижным. Зонд представляет собой острую иглу, расположенную на конце гибкой консоли (кантилевера), закрепленной на основании. Типичный радиус кривизны кремниевых игл составляет порядка нескольких нанометров.

Данные исследования образцов до травления представлены в таблице 3 и на рис. 2.

Таблица 3. Статистические величины.

Параметр	**Значение**
Среднее значение:	2,736 мкм
Минимум:	0,000 мкм
Максимум:	5,565 мкм
Срединное:	2,789 мкм
Ra:	0,649 мкм
Rms:	0,796 мкм
Rms (зерен):	0,796 мкм
Асимметрия:	-0,231
Эксцесс:	-0,43
Площадь поверхности:	13,3198 10^{-9} m^2
Площадь проекции:	10,0786 10^{-9} m^2

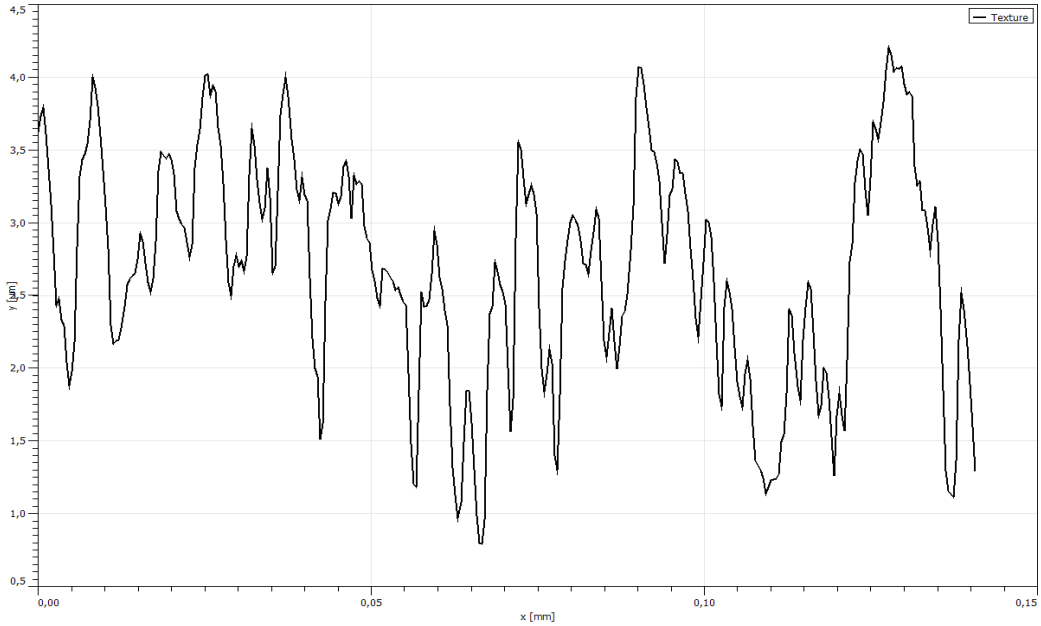


Рис. 2. Профиль сечения поверхности исходной подложки AlN

Анализируя полученные данные можно определить, что подложка AlN имеет первоначальный класс точности 7. По профилю сечения поверхности (рис. 2) можно заключить, что амплитуда пиков необработанной подложки высокая, и в целом не удовлетворяет необходимым параметрам для использовании ее в последующих технологических операциях. Что еще раз подтверждает необходимость ее дальнейшей обработки. Исследуя изображение, полученное в растровом электронном микроскопе (рис. 3), можно оценить довольно крупный размер исходного зерна, что и является основной причиной такой шероховатости.

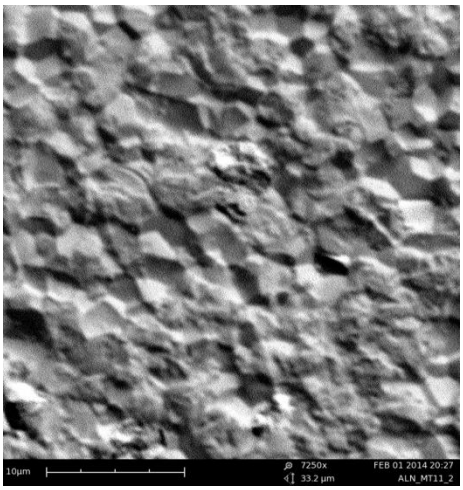


Рис. 3. Поверхность подложки AlN в растровом электронном микроскопе FEI Phenom

Эксперименты проводились на вакуумном универсальном посте (рис. 4), который относится к УВН периодического действия и предназначен для нанесения широкого спектра тонкопленочных покрытий. Данное оборудование является результатом модернизации прототипа и позволяет формировать различные тонкопленочные структуры в едином вакуумном цикле.



Рис. 4. Вакуумный универсальный пост (ВУП)

В состав вакуумного универсального поста (рис. 5) входят следующие основные узлы и системы: турбомолекулярный насос Edwards nEXT400D (1), рама (2), высоковакуумный затвор (3), рабочая камера (4), магнетрон (5), клапан напуска атмосферы (6), ввод вращения (7), двигатель РД-09 (8), датчики измерения вакуума WRG (9), дуговой источник ИД-200-01 (10), электромагнитные клапана (11, 12), форвакуумный механический насос Edwards E2M40 (13), автономный источник ионов (14), байпасная магистраль (15).

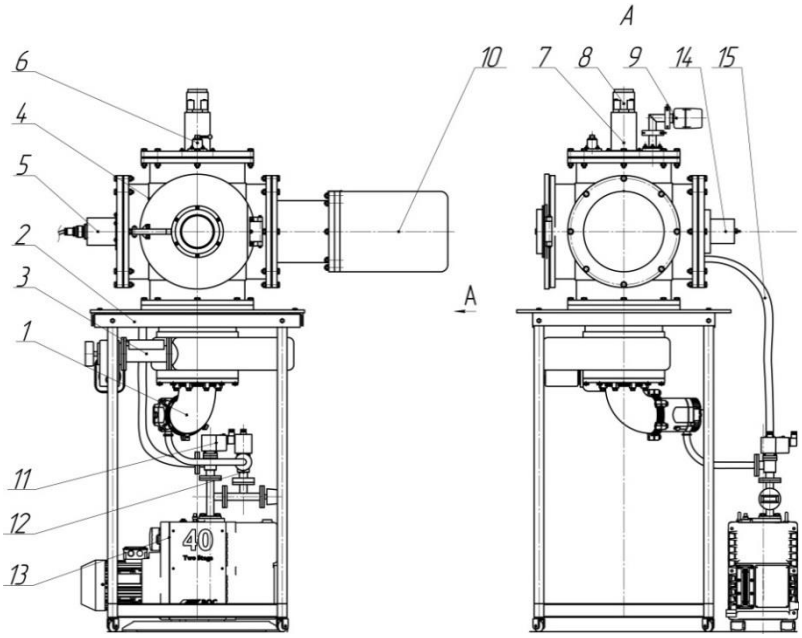


Рис. 5 Общий вид вакуумного универсального поста (ВУП)

Технические характеристики ВУП:

1. Предельное остаточное давление в рабочей камере: не более 10^{-3} Па;
2. Время получения высокого ($4 \cdot 10^{-3}$ Па) вакуума: 30 мин;
3. Количество технологических источников: 3;
4. Тип источников: - магнетрон с ВЧ источником (МРС);
   - автономный источник ионов (АИИ);
   - дуговой источник ИД-200-01;
5. Мощность источника ВЧ магнетронного распыления: 1 кВт;

6. Рабочее напряжение дугового источника: 20…40 В;
7. Максимальное ускоряющее напряжение АИИ: 1 кВ;
8. Расход холодной воды 15±1˚С при давлении 0,3…0,4 МПа: 550 л/час;
9. Максимальная потребляемая мощность в установившемся режиме: 5 кВт.

Травление подложек нитрида алюминия

Сущность процесса ионного травления заключается в следующем. Рабочий газ аргон ионизируется, разгоняется разностью потенциалов. Высокоэнергетичные ионы бомбардируют подложку и выбивают частицы нитрида алюминия, делая его поверхность менее шероховатой. Подложка закрепляется на подложкодержателе под углом 60^0 относительно нормали. Так как рельеф поверхности имеет множество микронеровностей с различными углами падения ионов на поверхность материала, то. коэффициент распыления материала для каждого отдельного микроучастка поверхности будет различен (рис. 6). А меняя угол расположения подложки, ионы выбивают наиболее выступающие вершины, тем самым выравнивая поверхность.

Эксперимент проводился при разных режимах работы автономного источника ионов, а также при разной длительности обработки. Результаты исследований в сканирующем зондовом микроскопе и параметры эксперимента представлены в таблице 4 и на рис. 7.

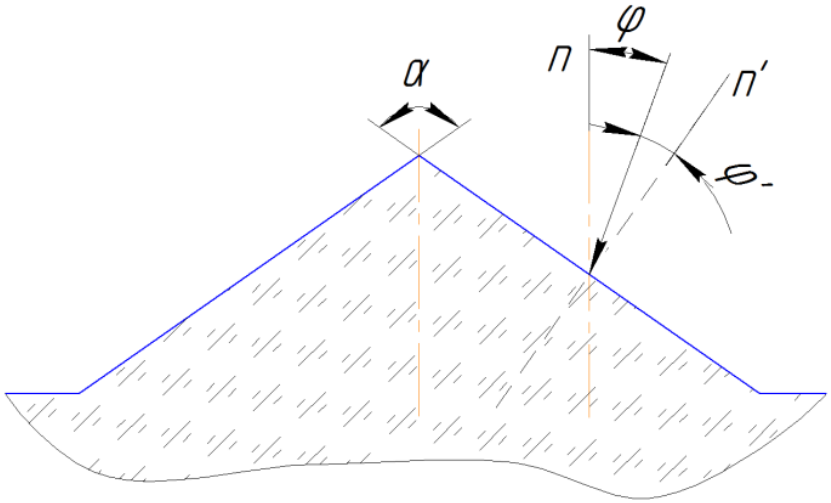
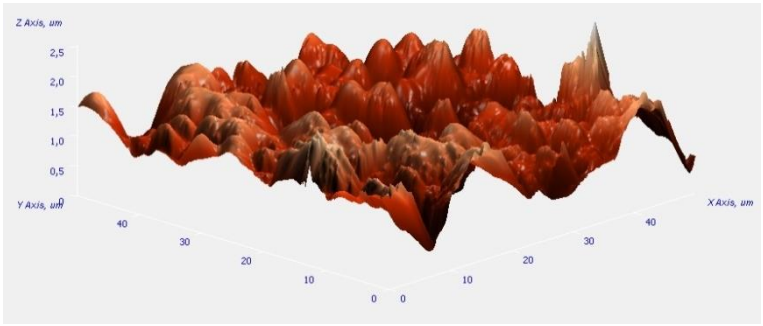


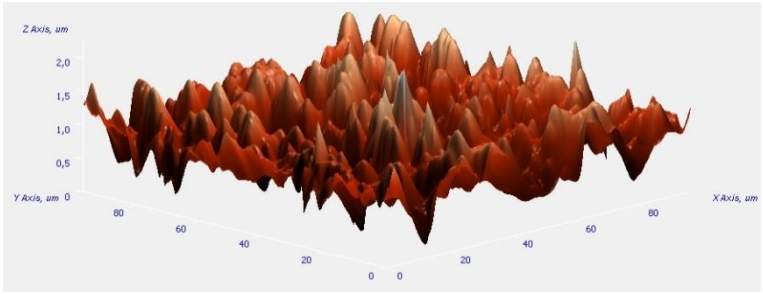
Рис. 6. Геометрическая модель микронеровности поверхности

Таблица 4. Статистические величины после травления

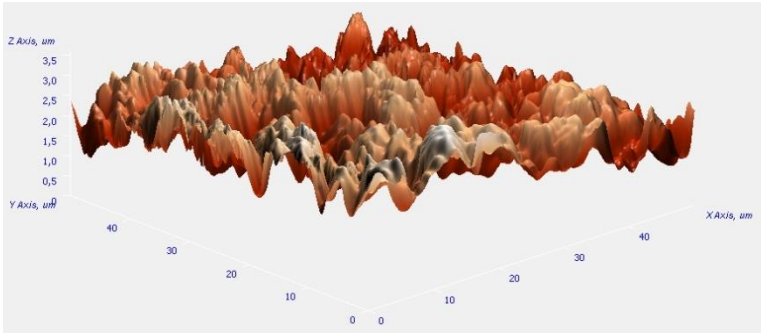
№ эксперимента	1	2	3
Угол наклона, гр	60	60	60
Разность потенциалов, кВ	0,996	0,6	1,007
Ток, мА	11	8	10
Время травления, мин	15	60	60
Ra, мкм	0,273	0,236	0,384
Peak-to-peak, мкм	2,676	2,263	2,849



а)



б)



в)

Рис. 7. Подложки AlN после ионного травления: а) образец №1, б) образец №2, в) образец №3

Выводы и заключение

Проведя эксперименты по ионно-лучевому травлению, удалось снизить первоначальную шероховатость в несколько раз. Однако из-за достаточно высокой исходной неравномерности, вызванной наличием крупного зерна у образцов, необходимо проводить некоторые предварительные механические операции для снижения первоначальной шероховатости, для того, чтобы достигнуть более высокого класса точности поверхности.

Литература

1. *Костенко В.И., Серегин В.С, Грошкова Л.А., Василевич А.И.* Перспективы использования высокотеплопроводной керамики из нитрида алюминия в космическом приборостроении / Вопросы миниатюризации в современном космическом приборостроении: труды семинара ИКИ РАН. – Таруса, 2004. – С. 250-256.
2. *Данилов Б.С., Киреев В.Ю.* Ионное травление микроструктур. – М.: Советское радио, 1979. – 104 с.

УДК 621.389

УМЕНЬШЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОДЛОЖЕК AlN С ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ ИОННЫМ ТРАВЛЕНИЕМ

Юлия Сергеевна Макарова [(1)], Алина Александровна Доброносова[(1)], Денис Дмитриевич Васильев[(2)]
студент 3 курса [(1)], студент 5 курса,[(2)],
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: К.М. Моисеев,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Введение

Основной наиболее характерной тенденцией развития технологии микроэлектроники является непрерывное повышение точности изготовления как элементов «традиционных» ИС, так и микроструктур, на основе которых строятся приборы функциональной микроэлектроники. Дальнейшее повышение быстродействия и степени интеграции требует получать при массовом изготовлении элементы с субмикронными размерами. Получение данных элементов требует высокой точности выполнения операций, применяемых при изготовлении ИС. Соответственно, также необходимо соответствовать требованиям высокой точности предварительной обработки основ ИС – подложек [1].

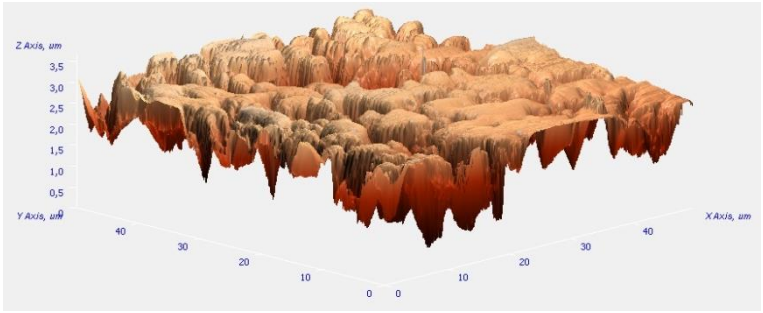
Развитие ряда областей новой техники вызывает необходимость создания керамических материалов, характеризующихся высокой термической стойкостью, инертностью к агрессивным средам, значительной механической прочностью и хорошими электроизоляционными свойствами и высокой теплопроводностью. Одним из наиболее перспективных материалов, отвечающих этим требованиям, является керамика на основе нитрида алюминия. Применяемый в настоящее время разработчиками электронной аппаратуры оксид бериллия, который имеет лучшую среди диэлектриков теплопроводность, является остродефицитным, малодоступным и высокотоксичным материалом, В связи с этим приобретает особое значение поиск альтернативного материала. Одним из таких материалов является нетоксичный экологически чистый нитрид алюминия. К тому же, керамика из нитрида алюминия по коэффициенту теплового расширения ближе к кремнию и арсениду галлия, основа большинства кристаллов, применяемых в электронике, чем керамика из оксида бериллия [2].

Состояние поверхности подложки оказывает существенное влияние на структуру наносимых пленок и параметры пленочных элементов. Большая шероховатость поверхности подложки, наличие на ней микронеровностей уменьшают толщину пленок, вызывают локальное изменение электрофизических свойств пленок и тем самым снижают воспроизводимость параметров пленочных элементов и их надежность. Поэтому подложки для тонкопленочных ИМС должны иметь минимальную шероховатость, быть без пор и трещин. Так, при нанесении тонких пленок толщиной до 100 нм допустимая высота микронеровностей не должна превышать 25 нм, что соответствует 14-му классу чистоты поверхности подложек.

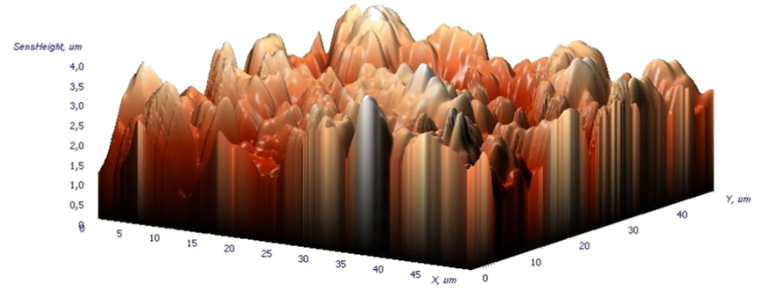
В данной работе было исследовано влияние режимов ионного травления (в том числе и реактивного) подложек нитрида алюминия с предварительной механической обработкой на значения шероховатости подложек.

Исходные данные и описание экспериментального стенда

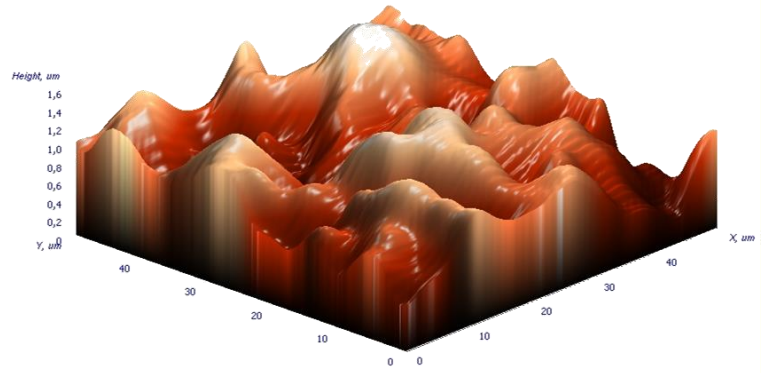
Исходными образцами были три предварительно механически обработанные подложки нитрида алюминия. Шероховатость подложек была исследована методом сканирующей зондовой микроскопии на микроскопе Solver NEXT (рис. 1, таблица №1).



а)



б)



в)

Рис. 1. Подложки AlN после механической обработки: а) образец №1, б) образец №2, в) образец №3

Таблица 1. Значения параметров подложек до травления

Параметр	Подложки AlN		
	Образец №1	Образец №2	Образец №3
Шероховатость, мкм	0,411	0,396	0,224
Peak-to-peak, мкм	5,163	2,966	1,613

Данные измерений показывают, что шероховатость предварительно механически обработанных подложек нитрида алюминия варьируется в интервале Ra=0,2…0,4 мкм, что соответствует 9-10 классу шероховатости и не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к подложкам

Экспериментальной установкой, в которой проводился процесс ионного травления, является вакуумный универсальный пост (рис. 2), который относится к УВН периодического действия и предназначен для нанесения широкого спектра технологических операций вакуумного осаждения тонких пленок и ионного травления.

Данное оборудование является результатом модернизации прототипа и позволяет формировать различные тонкопленочные структуры в едином вакуумном цикле.



Рис. 2. Вакуумный универсальный пост (ВУП)

В состав вакуумного универсального поста входят следующие основные узлы и системы (рис. 3): турбомолекулярный насос Edwards nEXT400D (1), рама (2), высоковакуумный затвор (3), рабочая камера (4), магнетрон (5), клапан напуска атмосферы (6), ввод вращения (7), двигатель РД-09 (8), датчики измерения вакуума WRG (9), дуговой источник ИД-200-01 (10), электромагнитные клапана (11, 12), форвакуумный механический насос Edwards E2M40 (13), автономный источник ионов (14), байпасная магистраль (15).

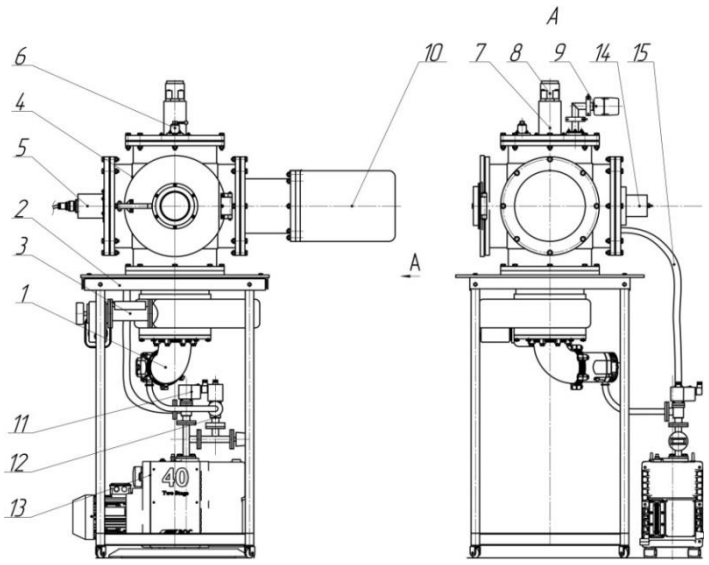


Рис. 3. Общий вид вакуумного универсального поста (ВУП)

Технические характеристики ВУП:

1. Предельное остаточное давление в рабочей камере: не более 10^{-3} Па;
2. Время получения высокого ($4 \cdot 10^{-3}$ Па) вакуума: 30 мин;
3. Количество технологических источников: 3;
4. Тип источников:

- магнетрон с ВЧ источником (МРС);
- автономный источник ионов (АИИ);
- дуговой источник ИД-200-01;

5. Мощность источника ВЧ магнетронного распыления: 1 кВт;
6. Рабочее напряжение дугового источника: 20…40 В;
7. Максимальное ускоряющее напряжение АИИ: 1 кВ;
8. Расход холодной воды 15±1˚С при давлении 0,3…0,4 МПа: 550 л/час;
9. Максимальная потребляемая мощность в установившемся режиме: 5 кВт.

Проведение эксперимента и результаты измерений

Подложка устанавливалась в вакуумной камере установки под углом 60° между нормалью к подложке и направлением движения ионного пучка.

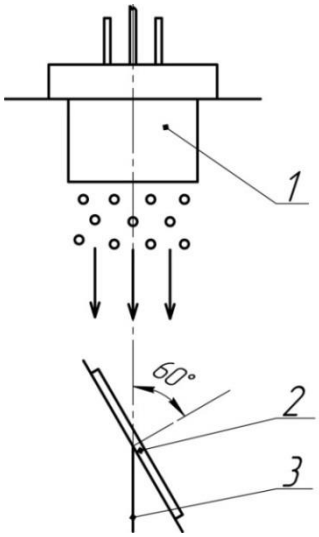


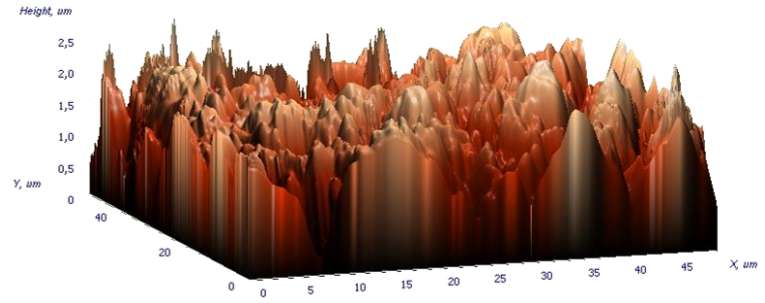
Рис.4. Схема эксперимента: 1 – источник ионов; 2 – подложка; 3 – подложкодержатель

Эксперимент проводился при равных режимах работы автономного источника ионов для всех трёх подложек.Образец №1 был протравлена реактивно смесью газов аргона и кислорода, а образцы №2 и №3 – только аргоном (таблица 2).

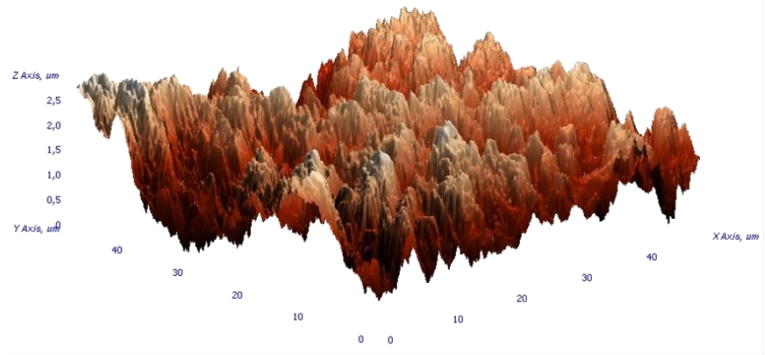
Таблица 2. Параметры процесса обработки подложек

№	Параметры	№ образца		
		1	2	3
1	Рабочее давление, Па	0,11	0,11	0,11
2	Показания РРГ, л/час	2,29	2,02	2,02
3	Соотношение Ar/ O_2, N_2	1/1	-	-
4	Разряд, напряжение, В	295	281	281
5	Подаваемый ток, мА	35	35	35
6	Ток разряда, мА	224	222	222
7	Напряжение пучка, В	1007	1000	1000
8	Ток пучка, мА	10	10	10
9	Ускоряющее напряжение, В	600	396	396
10	Ускоряющий ток, мА	3,1	2,6	2,6
11	Время травления, мин	60	60	60

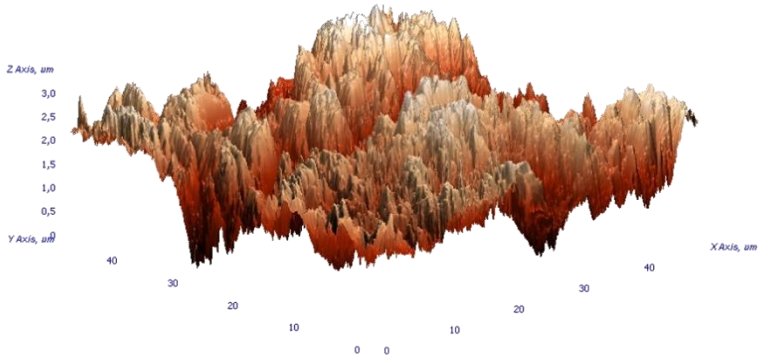
Полученные после обработки образцы исследованы в сканирующем зондовом микроскопе Solver NEXT (рис. 5, таблица 3).



а)



б)



в)

Рис. 5. Подложки AlN после ионного травления: а) образец №1, б) образец №2, в) образец №3

Таблица 3. Сводные данные проведенных исследований

Параметр	До травления			После травления		
	№1	№2	№3	№1	№2	№3
Угол наклона, гр	-	-	-	60	60	60
Разность потенциалов, кВ	-	-	-	1	1	1
Ток, мА	-	-	-	11	10	10
Время травления, мин	-	-	-	60	60	60
Шероховатость, мкм	0,411	0,396	0,224	0,408	0,421	0,430
Peak-to-peak, мкм	5,163	2,966	1,613	3,879	2,964	1,43

Выводы и заключение

По результатам полученных измерений можно заключить, что при реактивно-ионном травлении уменьшается параметр Peak-to-peak, тогда как шероховатость остается на таком же уровне, а при травлении только в среде инертного газа (аргона) шероховатость предварительно механически обработанных подложек увеличивается. То, что значение параметра Peak-to-peak остается неприемлемо большим даже при реактивно-ионном травлении, позволяет сделать вывод о слишком низком качестве исходной

подложки. Тогда как для уменьшения шероховатости следует подбирать иные углы обработки вследствие зависимости коэффициента распыления от угла ионного травления.

Литература

1. *Данилов Б.С., Киреев В.Ю.* Ионное травление микроструктур. – М.: Советское радио, 1979. – 104 с.
2. *Непочатов Ю.К.,Земницкая А.А., Муль П.* Разработка керамики на основе нитрида алюминия для изделий электронной техники. / Современная электроника. – 2011, №9. – С. 14-16.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАННОГО ЗАКОНА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ВАКУУМНЫХ МЕХАНИЗМОВ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОРЕОЛОГИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ

Михаил Анатольевич Николаев,
магистр 2 года,
кафедра «Электронное Машиностроение»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: В.П. Михайлов,
доктор технических наук, профессор кафедры «Электронное машиностроение»

Введение

Важным средством повышения качества и эффективности производства изделий электронной техники является внедрение прогрессивных технологических методов, которые позволяют решать принципиально новые задачи или обеспечивают более высокий уровень решения задач производства.

Особенно актуален поиск альтернативных методов обработки в производстве продукции массового выпуска, таких, как приборы электронной техники. Одним из видов такой обработки является электронная литография с непрерывным перемещением координатного стола с полупроводниковой подложкой, при котором происходит непрерывное экспонирование поверхности подложки электронным пучком. При этом необходимо обеспечить очень высокую равномерность перемещения каретки координатного стола, поскольку любое отклонение от номинальной скорости приводит к возникновению погрешностей экспонирования подложки при формировании на ней топологического рисунка.

Одной из трудоемких операций в изготовлении приборов является разделение полупроводниковой пластины диаметром 100-200 мм на отдельные элементы круглой формы 1-3 мм (далее, кристаллов). Одним из методов разделения пластин является алмазное скрайбирование. Согласно этому способу, полупроводниковой пластине, закрепленной в поворотном устройстве, сообщают линейное перемещение относительно вращающейся оправки с алмазными дисками, закрепленной в шпинделе отрезного станка. При резке последовательным поворотом пластины на фиксированный угол получают контур кристаллов с линейной огранкой при заданном размере. Очевидно, что производительность инструмента невысока и существенно зависит от стойкости алмазных дисков, точности настройки прецизионного оборудования, а также, таким методом тяжело получить элементы, например, круглой формы, что требуется в ряде изделий [2].

Более перспективным является метод резки пластин из неметаллических материалов с помощью лазера. Метод отличается большими технологическими возможностями. Однако имеет место ряд трудно решаемых проблем. При такой обработке пластины имеют неудовлетворительную шероховатость поверхности среза и ограничение

глубины обработки. Применительно к кремниевым пластинам [2] для разделения на отдельные элементы до последнего времени использовалось химическое травление пластины через маскирующее покрытие. В качестве маскирующего покрытия, как правило, используются драгоценные металлы, обладающие высокой стойкостью к кислотным растворителям. Альтернативный метод струйно-абразивной резки пластины через маскирующее покрытие (дисков термопластичного полимера) показал себя эффективным для решения поставленной задачи резки пластин. Метод заключается в удалении материала заготовки при ударе абразивных частиц о ее поверхность. При этом для обработки используется смесь абразивного порошка и сжатого воздуха, который придает частицам необходимую для съема материала кинетическую энергию. Однако при данном виде обработки большое значение имеет равномерность перемещения пластины или сопел, из которых подается абразивно-воздушная смесь (в зависимости от типа установки струйно-абразивной обработки). Неравномерность перемещения приведет к большому различию во времени нахождения под струей абразива разных частей пластины и, соответственно к существенной неравномерности обработки. Установлено, что для обеспечения равномерности и качества обработки необходимо регулировка скорости перемещения обрабатывающих сопел 0.05…0.3 м/сек.

Для обеспечения заданного закона перемещения механизмов авторами предлагается применить пневматический привод сопел с электрореологическим (ЭР) регулятором скорости [3].

Электрореологические жидкости (ЭРЖ)

ЭР жидкость (ЭРЖ) – это взвесь микрометровых ($1 \div 100$ мкм) электропроводящих частиц в непроводящей электричество органической жидкости.(20-30% частиц в ЭРЖ).

При воздействии на ЭРЖ внешним электрическим полем происходит изменение ее реологических свойств (вязкости, упругости и пластичности), которое носит название ЭР эффекта [1] (рис. 1)

Для создания ЭРЖ, проявляющей заметный ЭР эффект, необходимо третье вещество – активатор, адсорбирующийся на поверхности твердых частиц. Самым распространенным активатором является вода, обладающая хорошими сорбционными свойствами. Активатор (диполи молекул воды) определяет электрические свойства поверхности частиц, зависящие от внешнего электрического поля.

Вязкость ЭРЖ без приложения внешнего электрического поля составляет 0,2-0,3 Па/с при температуре 25 °С. При воздействии электрического поля напряженностью $E = 3 \cdot 10^6 \div 5 \cdot 10^6$ В/м предел текучести структуры, образованной частицами ЭРЖ, τ_0 будет составлять от 3 до 5 кПа, и его величина ограничивается напряжением поля, соответствующем электрическому пробою в жидкости. Рабочая температура для ЭРЖ зависит от типа поляризационного механизма, используемого для активации жидкости. ЭРЖ, поляризуемые механизмом ионной проводимости, обычно работают при температурах от 10°С до 90°С; для остальных ЭРЖ имеет место более широкий диапазон температур: от -25°С до +125°С.

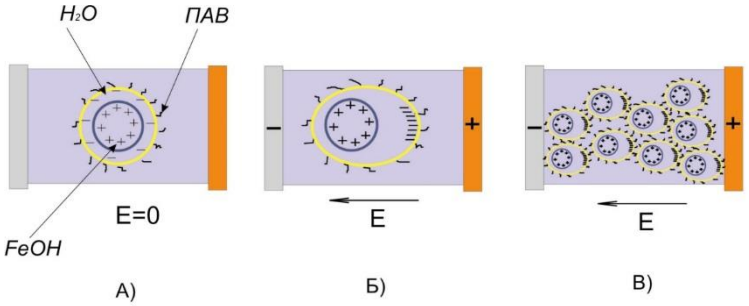


Рис. 1. Электрореологический эффект:

А) ЭРЖ без приложения внешнего электрического поля, Б) приложение внешнего электрического поля к ЭРЖ, В) дальнейшее увеличение напряженности поля

К ЭРЖ предъявляется требование стабильности свойств – отсутствия расслоения фаз и изменения свойств дисперсной системы во времени. Это требование удовлетворяется введением четвертого компонента – поверхностно-активного вещества (обычно используется олеиновая кислота).

Дисперсионными средами могут служить неполярные и слабополярные органические жидкости с достаточно высоким электрическим сопротивлением (порядка 10^{10} Ом · см).

Электрореологическим эффектом называется быстрое обратимое изменение вязко-упруго-пластичных свойств ЭРЖ (суспензий) в сильных электрических полях.

Можно объяснить электрореологический эффект поляризуемостью частиц дисперсной фазы, которая связана с возникновением дипольного момента у частиц при адсорбции на их поверхности полярного вещества – активатора.

Можно также провести аналогию между действием магнитного поля на магнитные частицы и электрического поля на частицы, легко поляризуемые или обладающие жестким дипольным моментом.

В слабоконцентрированных суспензиях поле вызывает только ориентацию частиц, при больших концентрациях – ориентацию и агрегирование, т.е. выстраивание цепочек частиц вдоль линий поля и перемещение частиц в сторону наибольшей напряженности поля. (рис. 2)

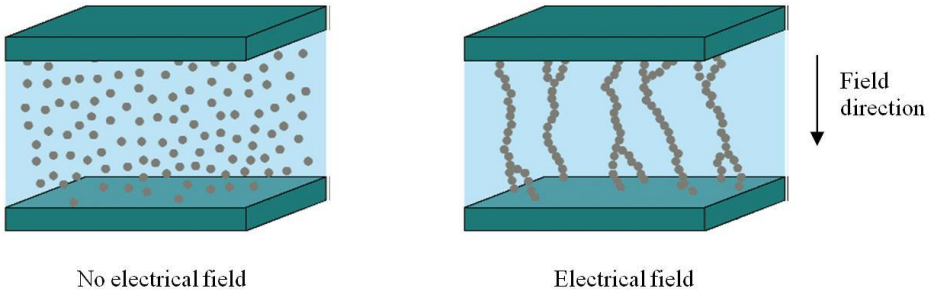


Рис. 2. Электрореологический эффект

Пневматический привод с ЭР регулятором скорости

Основными элементами привода (рис. 3 и 4) являются пневматический (2) и гидравлический (7) цилиндры, соединенные между собой общим штоком (8). Движение штока пневматического цилиндра (ПЦ) совместно с гидравлическим цилиндром (ГЦ) осуществляется за счет подачи сжатого воздуха от компрессора через пневматический распределитель (14) в камеры ПЦ поочередно. Схема управления движением ПЦ позволяет осуществлять возвратно-поступательное движение штока, как в ручном, так и в автоматическом режиме. Камеры ГЦ заполнены ЭР жидкостью через емкости (4) и соединены между собой через ЭР дроссель (ЭРД) (5). Общий шток ПЦ и ГЦ соединен с ультразвуковым датчиком положения (9). Давление в паре ГЦ регистрируется аналоговыми датчиками давления (3) и (6).

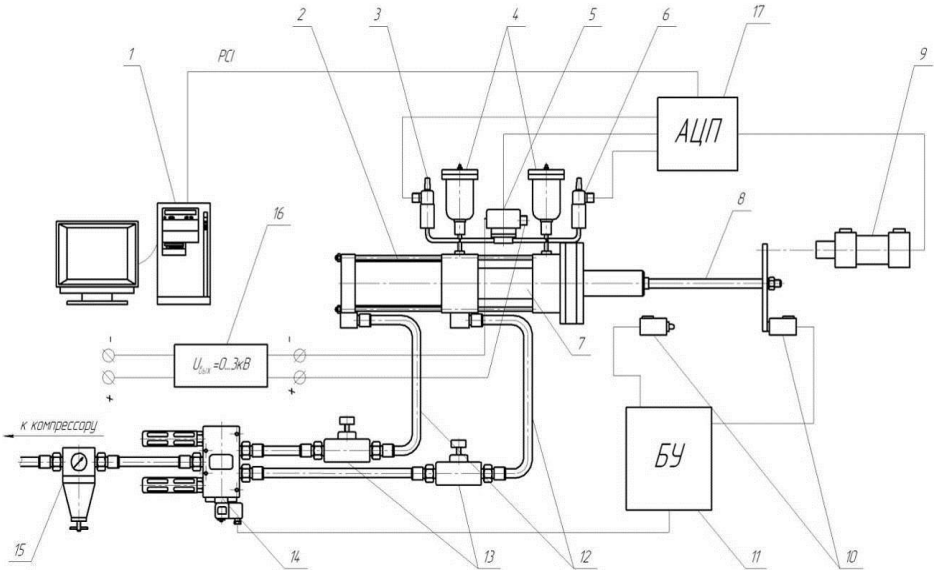


Рис. 3. Схема пневмогидравлического привода с ЭР регулятором скорости штока:1- компьютер; 2- пневмоцилиндр; 3,6- датчики давления; 4- емкости с ЭР жидкостью; 5- ЭР дроссель с датчиком температуры; 7- гидроцилиндр; 8- шток; 9- датчик положения; 10- конечные выключатели; 11- блок управления; 12- пневмотрубопровод; 13- вентили; 14- пневмораспределитель; 15- газовый редуктор; 16- DC-DC преобразователь;17- аналогово-цифровой преобразователь.

При движении штока происходит перетекание ЭР жидкости из одной полости ГЦ в другую через ЭРД. При достижении конечного выключателя (10) происходит изменение направления движения штока за счет сигнала с блока управления (11). При подаче управляющего напряжения на электроды ЭРД происходит структурирование ЭР жидкости и изменение скорости движения штока. При этом измеряются, для каждого значения управляющего напряжения, скорость движения штока V и разность давлений ΔP на рабочем цилиндрическом зазоре дросселя. Показания датчиков через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) (17) регистрируется на персональном компьютере (1).

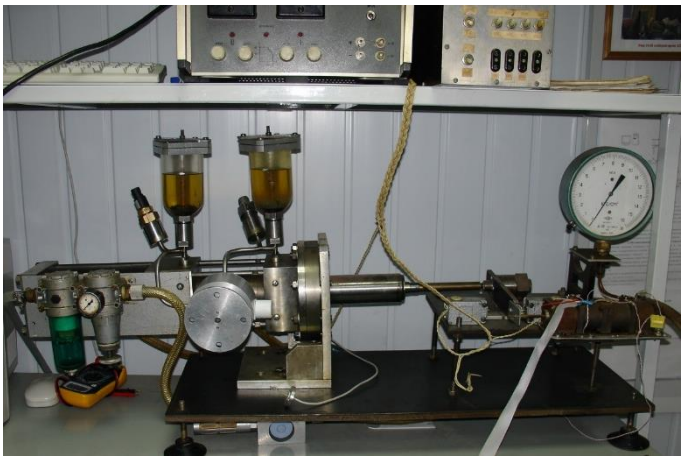


Рис. 4. Пневмогидравлический привод с ЭР-регулятором скорости штока

В данном приводе применен ЭРД с кольцевым рабочим зазором (рис. 4). Данный зазор (ширина зазора 0,25 мм на сторону) образован электродом и фланцем (рис. 4). При подаче разности потенциалов U=0-3 кВ между фланцем и электродом через токоввод, на протекающую в рабочем зазоре жидкость начинает действовать внешнее электрическое поле и за счет ЭР эффекта [1] происходит изменение реологических свойств ЭРЖ в зазоре. При этом происходит изменение условий течения ЭРЖ, а соответственно и скорости штока. Высокое быстродействие этих процессов позволяет производить регулировку скорости штока с высокой точностью.

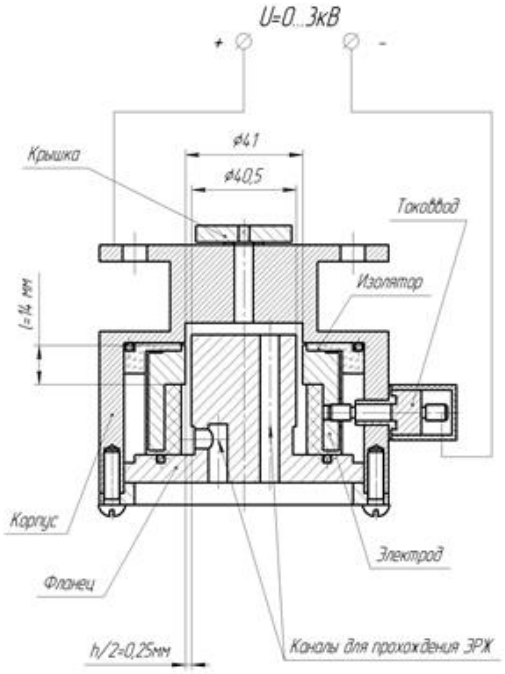


Рис. 5.Схема ЭР дросселя

Экспериментальные исследования скорости штока привода

Экспериментальные исследования проводились на стенде пневмогидравлического привода с ЭР регулированием скорости перемещения штока (рис. 1 и 2)

Для определения изменения скорости штока (8) за счет управляющей программы на персональном компьютере (1) (рис. 6) фиксировалось и записывалось в файл его положение при разных значениях давления в ПЦ, которое менялось при помощи газового редуктора (15). Измерение положения штока (8) производилось ультразвуковым датчиком положения (9) (рис. 1)

В результате получены экспериментальные зависимости положения и скорости перемещения штока без управляющего напряжения и без ЭРЖ (рис. 5а), без подачи управляющего напряжения и с ЭРЖ (рис. 5б), а также с ЭРЖ при подаче управляющего напряжения 280 В на ЭРД (рис. 5в)

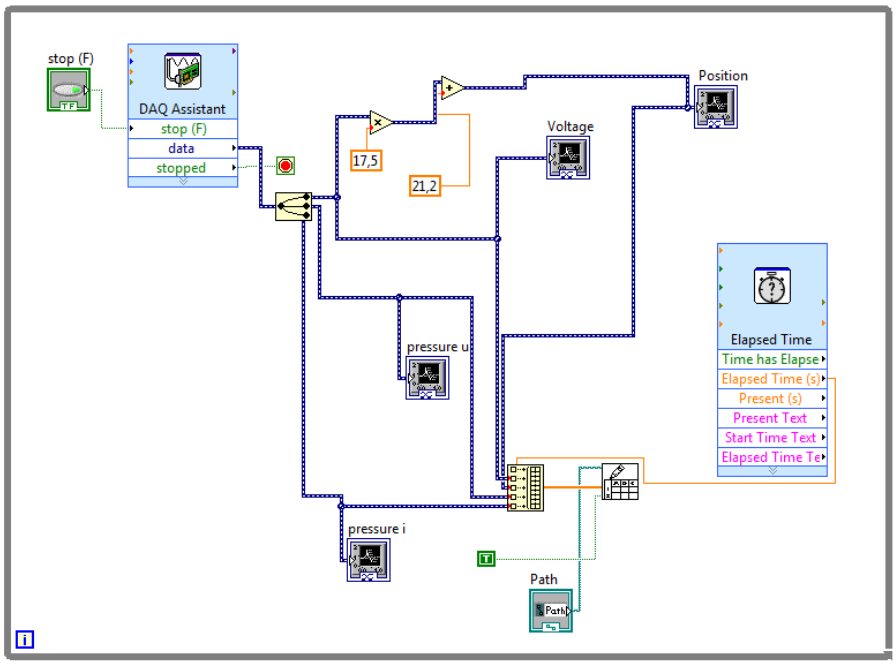
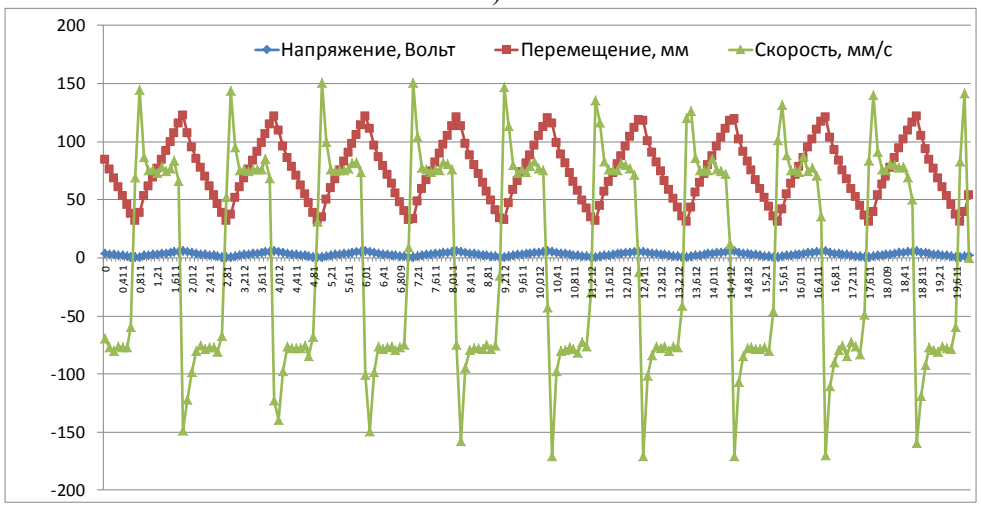


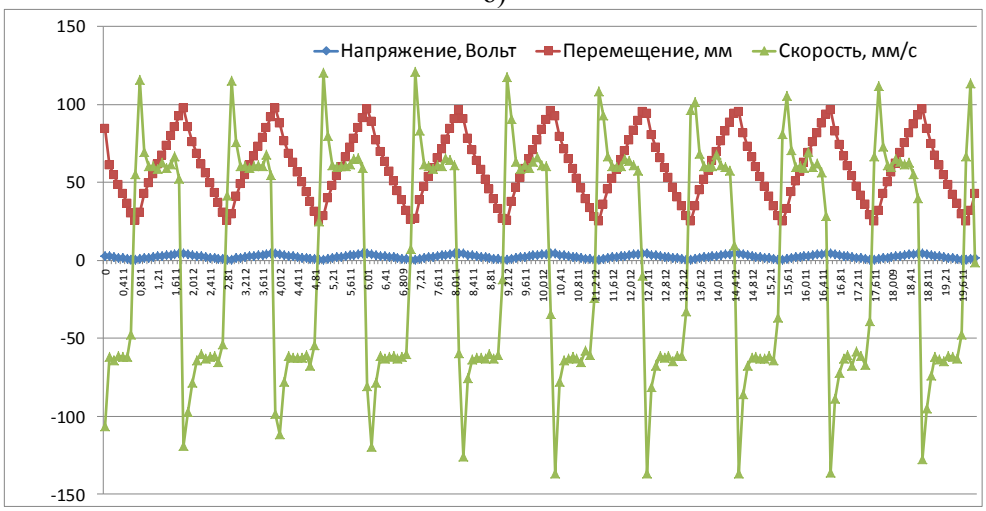
Рис. 6. Управляющая программа в среде LabView



а)



б)



в)

Рис. 5. Результаты экспериментов

Заключение

В работе приведены результаты исследовательских экспериментов, показывающих потенциал электрореологически управляемых устройств, в частности пневмогидравлического привода с электрореологическим управлением. Также приводится обоснование актуальности применения таких устройств для резки полупроводниковых пластин на кристаллы для нужд электронной промышленности.

Проведенные измерения дают понять, что при подаче управляющего напряжения в 280 В происходит изменение скорости движения штока на 20%.

Литература

1. *З.П.Шульман и др*., Электрореологический эффект – Минск: Наука и техника, 1972. – 172 с.
2. *И.Г. Пичугин.* Технология полупроводниковых приборов / И.Г. Пичугин, Ю.Н. Таиров. – Москва: Высшая школа, 1984. – 288 с.
3. 3. Механика и физика точных вакуумных механизмов: Моногр., В 2 т. / А.Т. Александрова, Н.С. Вагин, Н.В. Василенко и др.; Под ред. Е.А. Деулина. – М.: НПК “Интелвак”; Вакууммаш, 2002. – Т.2. – 152 с.

УДК 537.58

ВЫБОР МАТЕРИАЛА И КОНСТРУКЦИИ ИСПАРИТЕЛЯ

Мария Михайловна Присяжная, Сергей Сергеевич Сузый,
студенты 4 курса,
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Л.Л. Колесник,
кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Целью данной статьи является знакомство с методом пароструйного осаждения тонких пленок, экспериментальными результатами взаимодействия материалов и теоретическим обоснованием данных результатов.

Технология пароструйного осаждения (англ. Jet Vapor Deposition (JVD)) основана на использовании высокоскоростных струй инертного газа для нанесения компонентов требуемого материала. Откачивание камеры, в которой происходит осаждение, осуществляется механическим насосом до давления порядка 133 Па (1 торр).

Прошлые опыты показали, что JVD особенно хорошо подходит для осаждения припоя в микроэлектронике. В настоящее время осуществляется нанесение всех элементарных и легко-сплавных припоев , например, In, Sn , AuSn , InBi , InSn , но вызывают затруднения SnInAg и SnCuAg. Припой накладывает строгие требования к экономичности процесса и качеству наносимого материала , и в связи с этим JVD-метод имеет ряд преимуществ:

- высокие скорости осаждения как отдельных атомов, так и кластеров;
- точный состав;
- использование ионного травления для обеспечения адгезии;
- минимальные отходы, возможность использования дорогих материалов;
- совместимость с обычным фоторезистом и базовыми технологиями;
- возможность обработки как одной пластины, так и партии (пакетная обработка).

Нанесение осуществляется без токсичных сред или сточных вод, на подложках, температура которых близка к комнатной. JVD-метод обманчиво прост, но при этом имеет удачное сочетание полезных характеристик.

Типичный источник имеет диаметр цилиндрической насадки в 3 дюйма (7,62 см), с торцевой пластиной, имеющей выходное отверстие ~ 1 см в диаметре. Гелий или аргон, а иногда и азот, подается в сопло и выходит из него в виде струи. Обычно давление Р в

форсунке составляет несколько торр. А ниже по течению струи давление Pd ~ 1 торр или менее, но диапазон может быть широким: при различных применениях оба значения давления могут быть выше или ниже. Когда коэффициент P/Pd > 2, струя выходит со скоростью звука (при 298 К, скорость выхода составляет ~ 105 см/с). Существует значительный разброс в форме источника, размерах отверстий, и рабочих параметрах источника струи. Рис. 1. показывает обобщенную картину.

Источник пара находится выше по потоку от выхода сопла, области, в которой газ-носитель ускоряется до скорости звука. В зависимости от материала испарение можно осуществить несколькими способами, такими как термическое испарение, распыление тлеющего разряда, и микроволновой плазмы или постоянного тока (DC). Атомы золота, например, вводят сверху в поток, который будет захвачен и транспортирован вниз по течению струи.

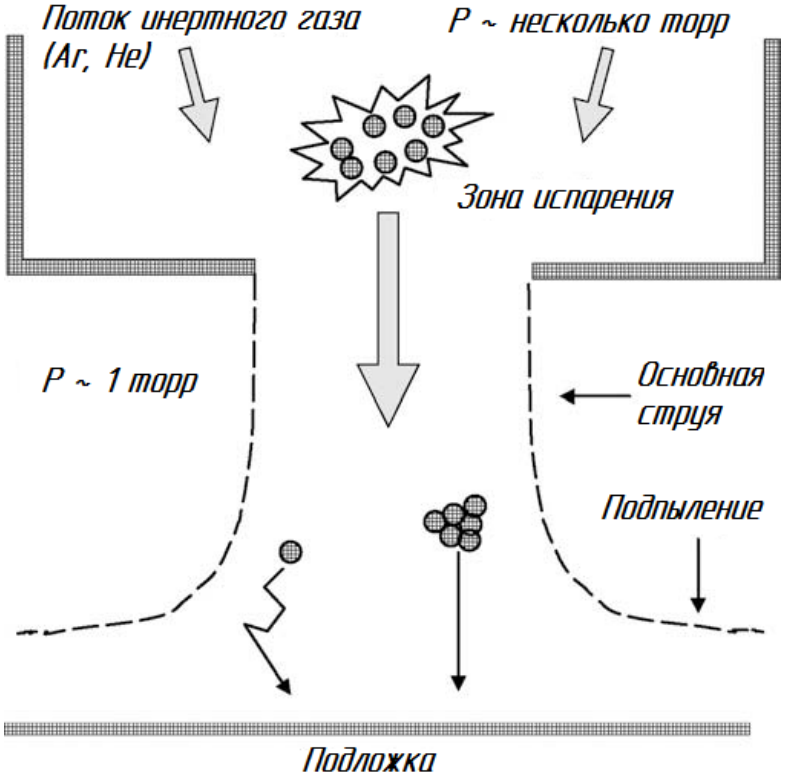


Рис. 1. Обобщенная картина JVD-метода

На плоской подложке, расположенной перпендикулярно струе, и несколько сантиметров ниже по течению будет быстро появляться пленка из золота; площадь и форма образовавшейся пленки из атомов золота в круговой зоне сравнима с площадью среза сопла. Образованная пленка располагается симметрично, но неравномерно. Распределение материала в зоне осаждения подчиняется закону Гаусса. Эффективность захвата для атомов металла , как правило, высока, а для кластеров еще выше. На рис.1. показаны траектории атома и кластера до воздействия с подложкой.

На рис. 2. показана система, которая используется для коммерческого производства паяных покрытий. AuSn может служить примером. Тонкая проволока из AuSn сплава непрерывно подается против вольфрамовой (W) структуры с электрическим нагревом катушки, расположенной чуть выше по течению выхода из сопла . При контакте проволока AuSn тает, размягчается и испаряется; отдельные Au и Sn атомы уносятся вниз по течению со струей к подложке где осаждаются на поверхности ~ 1 см в диаметре. Радиальная диффузия Au и Sn в струе дает AuSn пленку с гауссовым профилем . При постоянной AuSn подачи проволоки можно оценить поток Au и Sn атомов (постоянны), и

скорость осаждения AuSn пропорциональна скорости подачи проволоки, что значительно упрощает калибровку толщины.

Включение второй горячей нити в качестве источника термоэлектронной эмиссии электронов позволяет создать лавину электронов и воспламенить низковольтную, сильноточную аргоновую плазму, которая затем наносится струей на подложку. В дополнение к осаждению с высокой частотой этот источник может ввести ионы Ar^+ при высокой плотности ~ 1015 ионов/см^3, для предварительной очистки подложки или ионной бомбардировки растущей пленки.

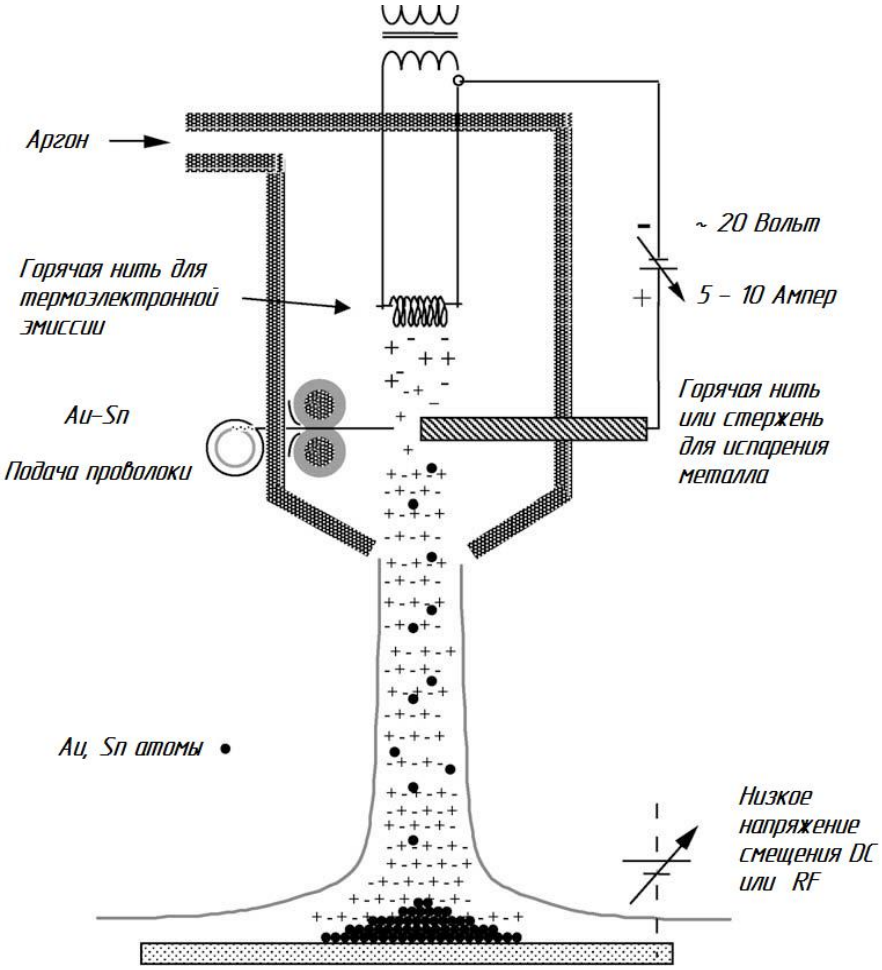


Рис. 2. Источник осаждения, сочетающий подачу проволоки (горячей нити) и электронную плазменную струю

Для проведения экспериментальных опытов пароструйного осаждения в лабораторных условиях была реализована установка, схема которой близка к схеме, изображенной на Рис. 2.

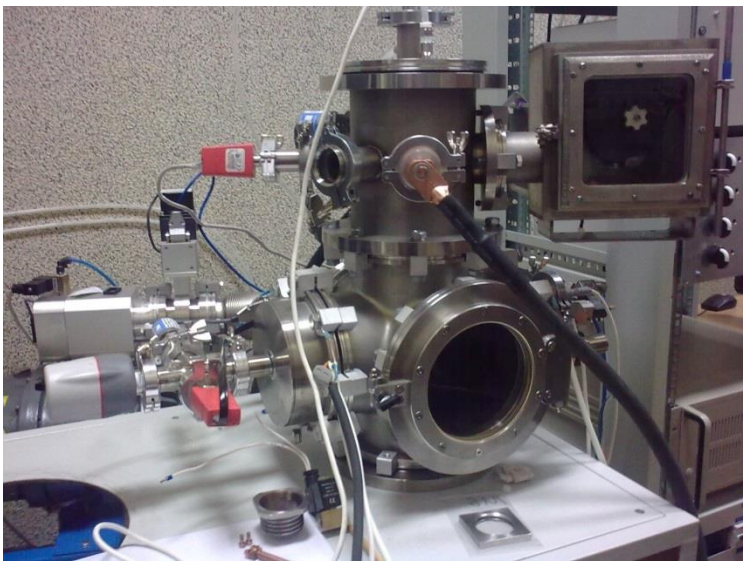


Рис. 3. Внешний вид стенда для проведения испытаний опытного образца источника пароструйного осаждения

Источник установлен на вакуумной камере, в которой располагается подложка. Вакуумная камера и источник разделены перегородкой, в которой установлено сопло, на два условно независимых объема. Откачка вакуумной камеры ведется через магистраль, которая подсоединяется к камере через диафрагмирующий клапан. Откачка же источника ведется только через небольшое по диаметру сопло, которое соединяет полость источника с вакуумной камерой. Такое разделение обеспечивает перепад давлений между камерой и источником, необходимый для возникновения струи рабочего газа.

В источнике установлен эмиттер электронов и нагреватель. В область нагрева подается проволока с материалом.

Рабочий газ подается в источник через два независимых канала.



Рис. 4. Внешний вид опытного образца источника пароструйного осаждения

Устройство опытного образца источника следующее.

Источник смонтирован в корпусе, на котором установлены все основные компоненты. На верхний фланец корпуса источника крепится крышка, в которой установлены штуцер для подсоединения газовой системы и токоввод, на который устанавливается эмиттер электронов.

На корпусе установлено устройство подачи проволоки материала с установленной в ней катушкой (например, Та).

Все элементы опытного образца источника выполнены из стандартных компонентов вакуумного оборудования.



Рис. 5. Камера подачи материала с установленной катушкой

Источник рассчитан на работу с материалом, подаваемым в зону испарения в виде проволоки. Проволока устанавливается в источник, намотанной на катушку стандартного размера. Внешний вид устройства подачи наносимого материала представлен на рисунке.

Был проведен ряд опытов, анализ которых позволил выбрать наиболее подходящие материал и конструкцию испарителей. Данные об опытах приведены ниже.

20.10.2013
Материал испарителя: Тантал
Конструкция испарителя: лодочка толщиной 0,12 мм (см. Рис.6)
Испаряемый материал: Медь

Процесс	I, A	P, мбар
Разогрев лодочки	90	-
Плавка меди	110	3,5x10-1
Плавка меди	125	3,7x10-1
Плавка меди	150	4,5x10-1
Плавка меди	170	4,8x10-1

Результат: медь расплавилась и покрылась “коркой” тантала.

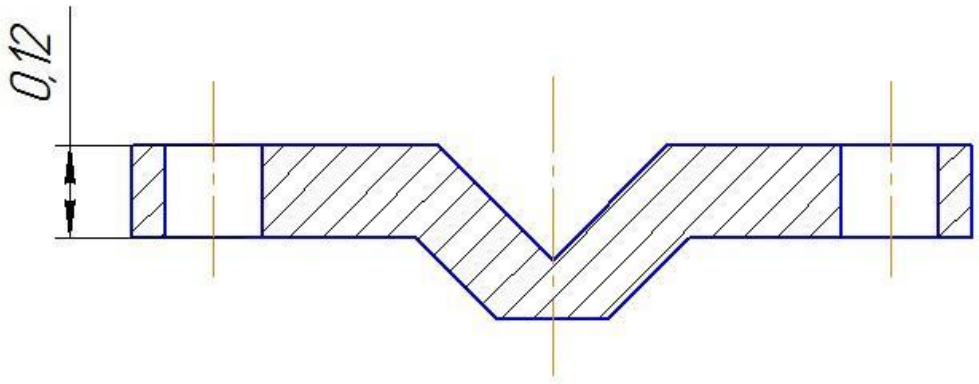


Рис. 6 Танталовая лодочка

28.10.2013
Опыт №1
Материла испарителя: Тантал
Конструкция испарителя: лодочка
Испаряемый материал: Медь
Результат: медь спаялась с лодочкой при I = 149 А.

Опыт №2
Материла испарителя: Молибден
Конструкция испарителя: лодочка
Испаряемый материал: Медь

	I, A	P, мбар
Плавка меди	100	10-3
Плавка меди	110	10-3
Плавка меди	120	10-3
Плавка меди	130	10-3

Результат: медь окислилась без расплавления, молибден охрупчился.

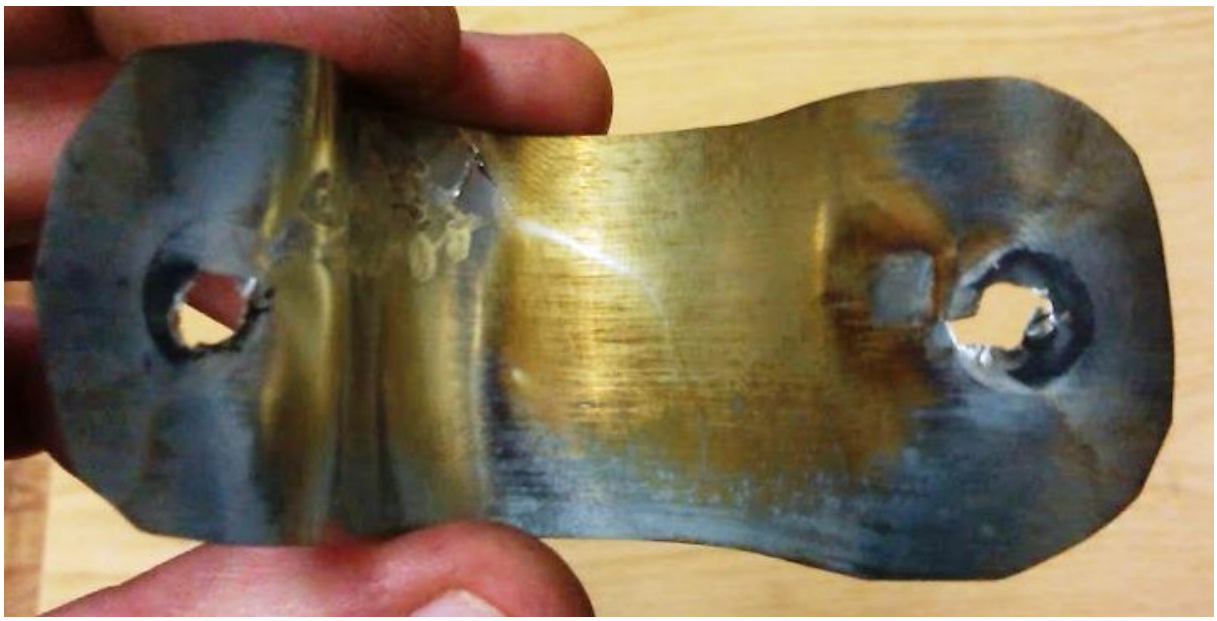


Рис. 7 Молибденовая лодочка

31.10.2013
Материла испарителя: Вольфрам
Конструкция испарителя: спираль
Испаряемый материал: Титан
P = 5x10-3 мбар
Iплав = 47 А
Результат: получено покрытие золотистого цвета, очевидно, нитрид титана.



Рис.8 Покрытие TiN

Далее была произведена обработка результатов экспериментов. Были изучены вопросы покрытия меди “коркой”, спаивания ее с лодочкой, а также охрупчивания испарителей. Теоретическое обоснование результатов приведено ниже.
Эвтектическое плавление характерно не только для высокодисперсных структур, формирующихся в результате кристаллизации расплавленных эвтектик, но наблюдается также при нагревании соприкасающихся кристаллов двух веществ, образующих эвтектическую систему.

Такое плавление соприкасающихся кристаллических веществ при более низкой температуре, чем температура плавления каждого из них, получило название контактного плавления.

Контактное плавление (КП) — это фазовый переход I рода, при котором в контакте двух (или более) разнородных кристаллов появляется жидкость при температуре ниже температуры плавления легкоплавкого кристалла. Необходимым условием проявления КП является наличие минимума на диаграмме состояния контактируемых кристаллов, т.е. явление КП имеет место в системах типа двойной сигары с точкой минимума на кривой ликвидуса, на диаграммах эвтектического типа и диаграммах с химическим взаимодействием компонентов. Минимальная температура, при которой в контакте кристаллов образуется жидкость, называется температурой контактного плавления (ТКП).Она, как правило, совпадает с температурой минимума на диаграмме состояния; в эвтектических системах ТКП практически совпадает с эвтектической температурой (Тэв). В системах с химическим взаимодействием компонентов при определенных условиях эксперимента (раздельный нагрев контактируемых кристаллов) ТКП может быть ниже температуры наинизшей эвтектики. В литературе это явление называется ΔТ - эффектом.

Огромную важность имеет проявление эффекта Ребиндера, т.е. адсорбционного понижения прочности твёрдых тел, облегчение деформации и разрушения твёрдых тел вследствие обратимого физико-химического воздействия среды. Открыт П. А. Ребиндером (1928) при изучении механических свойств кристаллов кальцита и каменной соли. Возможен при контакте твёрдого тела, находящегося в напряжённом состоянии, с жидкой (или газовой) адсорбционно-активной средой. Данный эффект весьма универсален — наблюдается в твёрдых металлах, ионных, ковалентных и молекулярных моно- и поликристаллических телах, стеклах и полимерах, частично закристаллизованных и аморфных, пористых и сплошных.

Основное условие проявления эффекта Ребиндера — родственный характер контактирующих фаз (твёрдого тела и среды) по химическому составу и строению. Форма и степень проявления эффекта зависят от интенсивности межатомных (межмолекулярных) взаимодействий соприкасающихся фаз, величины и типа напряжений (необходимы растягивающие напряжения), скорости деформации, температуры. Существенную роль играет реальная структура тела — наличие дислокаций, трещин, посторонних включений и др.

Характерная форма проявления эффекта Ребиндера — многократное падение прочности, повышение хрупкости твёрдого тела, снижение его долговечности. Так, смоченная ртутью цинковая пластина под нагрузкой не гнётся, а хрупко разрушается. С падением прочности и повышением хрупкости мы столкнулись в резпроведении эксперимента.

Величина эффекта Ребиндера зависит от природы твердого тела, характера деформации, напряженного состояния, усталостных явлений и ряда других факторов. Оно снижает сопротивление сдвига в поверхностном слое металла как в тангенциальном, так и нормальном направлениях. Вследствие этого увеличивается истинная площадь контакта, снижаются местные контактные напряжения и уменьшается сопротивление сдвигу выступов шероховатости поверхности.

В экспериментальных условиях необходимо знать, как взаимодействуют между собой Cu-Mo (медь — молибден), Cu-Ta (медь — тантал) и Cu-W (медь — вольфрам), поскольку Cu используется в качестве наносимого материала, а Mo, Ta и W — в качестве материала нагревательного элемента. И требуется, чтобы подаваемая проволока при нагревании и плавлении не взаимодействовала с нагревательным элементом.

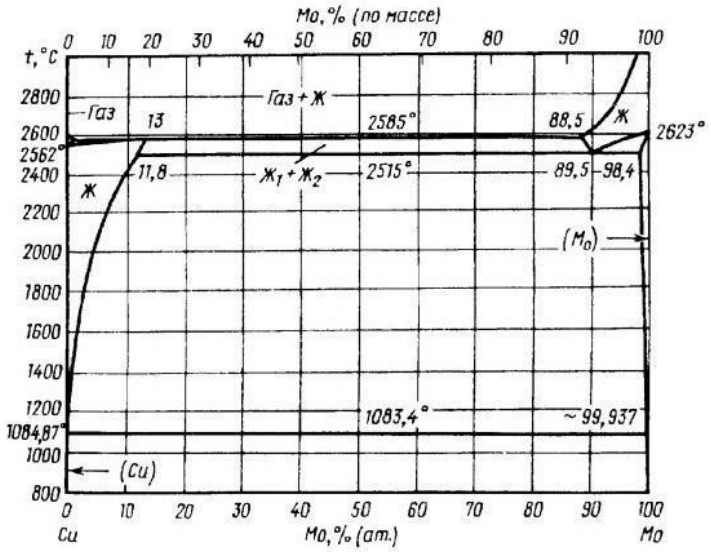


Рис. 9. Диаграмма состояния Cu-Mo

Медь-молибден. Cu и Mo не смешиваются в жидком и твердом состоянии, а взаимная растворимость компонентов при температуре 900 °C чрезвычайно мала. В системе имеют место монотектическое и эвтектическое равновесия (рис. 3). При температуре 2585 °C наблюдается также равновесие Газ + Ж = $Ж_1$.

Растворимость Mo в (Cu), полученная методом электромагнитной индукции, составляет 1,91 и 2,50% (ат.) при температурах 1900 и 2100 °C соответственно.

Растворимость Cu в (Mo), определенная методами малографического, рентгеновского анализов и измерения электрического сопротивления, равна ~2,3% (ат.) при температуре 950 °C.

Медь-тантал. Диаграмма состояния Cu-Ta не построена. Пытались получить сплавы Cu и Ta путем плавки в дуговой печи или спеканием смеси порошков Cu и Ta при температуре 1000 °C в течение 3 сут.

Рентгенограммы полученных материалов содержали линии, соответствующие объемно центрированной решетке Ta и гранецентрированной решетке Cu. Новых соединений в системе не обнаружено.

Сообщается об очень ограниченной взаимной растворимости элементов, указывается, что в жидкой Cu при температуре 1200 °C растворяется около 0,009% (ат.) Ta.

Медь-вольфрам. Cu и W не взаимодействуют ни в твердом, ни в жидком состояниях.

Выводы

Был проведен ряд экспериментов, в результате анализа которых выяснилось, что:

- Материал испарителя: предпочтителен вольфрам, тантал и молибден не подходят;
- Конструкция испарителя: спиральный тигель, лодочка не подходит.

Заключение

Был проведен обзор технологии нанесения тонких пленок методом пароструйного осаждения, изучены условия проведения процессов и технические возможности данного метода. Технология JVD-нанесения с источником в виде подачи проволоки была использована на практике в изучаемой лабораторной установке.

В результате выполнения лабораторных экспериментов были выявлены преимущества данного метода, а также возникающие проблемы, исходя из чего были подобраны наилучшие сочетания материалов, используемых в качестве испарителя и горячей нити. Изучены условия проведения экспериментального нанесения тонких пленок

и влияние на процесс нанесения и качество пленки таких параметров как давление и сила тока

Литература

1. P. Martin. Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings. Elsiever Inc, 2010. ISBN 978-0-8155-2031-3.
2. Electron Jet Vapor Deposition System. B. Halpern. United States Patent 5,571, 332. November 1996.
3. Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition and Jet Vapor Deposition of CdTe for High Efficiency Thin Film PV Devices. Final Technical Report. L. Woods, P. Meyers. National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA, 2002.
4. Диаграмма состояния двойных металлических систем. Под общей ред. Лякишева, Т.2, М.: Машиностроение, 1997. — 1024 с.
5. Ребиндер П. А., Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика, Избр. труды, М., 1979.

УДК 621.382.029.6.002, УДК 621.315.616

МОНТАЖ КРИСТАЛЛОВ ПРИ СБОРКЕ ВЫСОКОПЛОТНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

Юлия Сергеевна Боброва,
аспирант (2-й год),
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»,
Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Ю.Б. Цветков, доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры (далее – РЭА), являющаяся основным трендом в развитии современной электронной промышленности, основана на снижении массогабаритных характеристик РЭА при повышении её надёжности и экономичности.

Основной характеристикой микроминиатюризации является количество радиодеталей или элементов электрической схемы, размещённых в кубическом сантиметре объёма изделия. Так, если РЭА реализована на миниатюрных лампах с использованием печатного монтажа, то количество элементов в 1 куб. см составляет 0,3; на полупроводниковых приборах – 1-2; при использовании микромодулей – 10-20; при использовании методов плёночных микросхем – 100-200; при использовании твёрдотельных схем – 1000 и более элементов в 1 куб. см [1]. На основании чего следует вывод о целесообразности развития направления микроминиатюризации РЭА, основанного на использования совокупности методов микромодулей, тонкопленочных технологий и твёрдотельных схем.

Переход к более компактным микромодулям возможен за счёт реализации пассивной базы элементов по тонкоплёночным технологиям, а также за счёт сокращения площади, занимаемой интегральными схемами (далее – ИС). Добиться существенного выигрыша в сокращении площади, занимаемой ИС, возможно при интеграции в микромодуль бескорпусных кристаллов ИС.

При сборке микромодулей бескорпусные кристаллы ИС могут быть монтированы в объём микрокоммутационной платы (далее – МКП) следующим образом:

а) в сквозное «окно» с закреплением по периметру и фиксацией за счёт вышележащего изоляционного слоя;

б) в углубление на заготовке;

в) на подложку в «окно» конструкционного фотополимера.

Выбор способа монтажа кристаллов во многом зависит от материала заготовки, количества отводимого от кристалла тепла, производительности процесса и многого другого, включая область применения микромодуля с интегрированными кристаллами ИС. Так для микромодулей, работающих в СВЧ-диапазоне, необходимо применение металлокерамического теплоотводящего основания. Нитрид алюминия по параметрам теплопроводности, согласованности КТР с КТР кремния, технологичности обработки и др. является наиболее предпочтительным в качестве материала основания.

Монтаж кристаллов ИС в сквозное «окно» металлокерамической подложки на данный момент развития технологий не может быть реализован с высоким уровнем выхода годных заготовок микромодулей. В случае групповой заготовки с многочисленными кристаллами операция монтажа в сквозное «окно» является низко технологичной (невысокая производительность, снижение жёсткости металлокерамического основания за счёт формирования многочисленных «окон» и др.).

Монтаж кристаллов ИС в углубление (рис. 1) обеспечивает большую жёсткость металлокерамической заготовки, а также прилегание кристалла непосредственно к теплоотводящему основанию, однако, точность формирования углубления недостаточно высока (разброс по глубине может достигать до 20%).

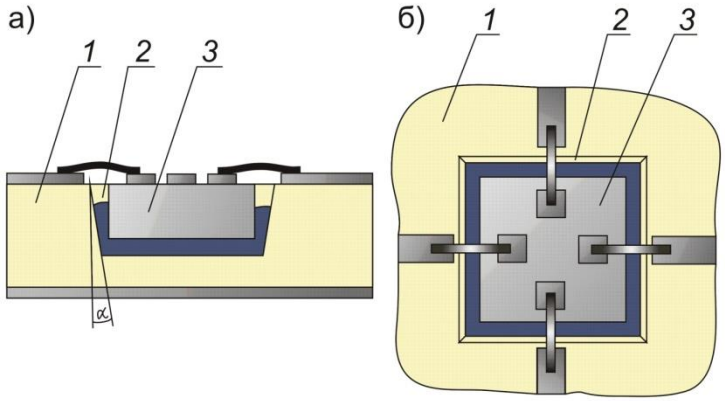


Рис. 1. Монтаж бескорпусного кристалла в углубление, полученное прецизионным лазерным фрезерованием [2]; а) разрез и б) вид сверху: 1 – подложка, 2 – углубление, 3 – кристалл

Среди вновь разрабатываемых способов монтажа бескорпусных кристаллов ИС на теплоотводящую подложку наибольший интерес для применения в микромодулях СВЧ-диапазона представляет способ монтажа кристаллов в «окно» конструкционного фотополимера (рис.2).

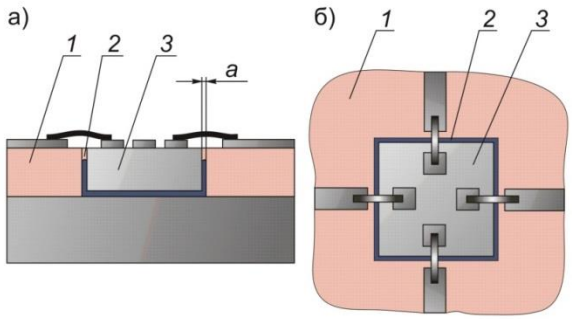


Рис. 2. Монтаж бескорпусного кристалла на подложку в «окно» конструкционного фотополимера; а) разрез и б) вид сверху: 1 – подложка, 2 – углубление, 3 - кристалл

Данный способ монтажа был апробирован на кафедре «Электронные технологии в машиностроении» в рамках совместной работы с ОАО «Концерн «Вега».

В качестве основания использовались подложки из нитрида алюминия размером 138х188х0,5 мм и 100х100х0,5 мм. На подложку в «окна» изоляционного слоя монтировались утонённые бескорпусные кристаллы на основании из кремния (толщина 75 мкм, □с=11,2 мм, размер минимальной контактной площадки □50 мкм (рис. 3)). Изоляционный слой, образующий «окна» над посадочными местами кристаллов, был сформирован из конструкционного фотополимера SU-8.

SU-8 – негативный фотополимер на основе эпоксидной смолы, запатентованный в 1989 году фирмой IBM (США). При облучении SU-8 ультрафиолетовым светом происходит поперечная «сшивка» (полимеризация) молекул фотополимера. Из всех известных на данный момент фотополимеров SU-8 после экспонирования обладает наибольшим количеством подобных «сшивок» на длину линейного полимера. Благодаря чему этот высокочувствительный фотополимер после облучения обладает высокой твёрдостью, химической инертностью, прозрачностью, повышенной термостойкостью (длительно выдерживает температуру в 300°С, в течение нескольких часов – 350°С). Низкое оптическое поглощение в ультрафиолетовом диапазоне позволяет получать в двухмиллиметровом слое фоторезиста микроструктуры с высотой, в 20 раз превышающей ширину, используя обычные методы контактной литографии.

Укрупнённое описание осуществленного технологического процесса монтажа бескорпусных утонённых кристаллов ИС на подложку в «окно» конструкционного фотополимера может быть представлено следующим образом:

1. На подготовленную подложку нитрида алюминия с одной стороны наносится фотополимер толщиной на 8-10 мкм больше толщины кристаллов (75 мкм);
2. Осуществляется сушка SU-8 посредством подведения тепла к основанию заготовки (температура 60°С в течение 60 мин., затем 90°С в течение 15 мин.);
3. Посредством УФ-экспонирования (длина волны 365 нм) через фотошаблон и последующей проявки скрытого изображения в слое SU-8 получают «окна»;
4. Фотополимер SU-8 подвергается окончательному термозадубливанию (температура 125°С в течение 20 мин.), после чего заготовка готова для монтажа кристаллов;
5. Кристаллы монтируются активной стороной на соответствующие посадочные места промежуточного носителя (стекло с локальными и глобальными реперными знаками для временного монтажа группы кристаллов);
6. На дно углублений посадочных мест кристаллов на заготовке МКП наносится постоянный адгезив (клей на основе эпоксидной смолы);
7. Промежуточный носитель с зафиксированным набором кристаллов позиционируется относительно знаков совмещения на заготовке МКП, опускается до упора и фиксируется несколькими технологическими зажимами по периметру;
8. Сушка адгезива и постоянная фиксация кристаллов в объеме заготовки МКП осуществляется при н.у. в течение 16 ч. При этом во время полимеризации адгезива кристаллы остаются зафиксированными относительно посадочных мест на временном носителе, который в свою очередь был закреплён относительно заготовки МКП;
9. После демонтажа временного носителя производятся измерения зазора (поз. 2 на рис. 3) между кристаллами и стенками фотополимера, образующего посадочные места.

На рис. 3 показана часть заготовки тестовой платы с монтированными кристаллами ИС на подложку из нитрида алюминия в «окна» фотополимера SU-8 с зазором равным 50 мкм.

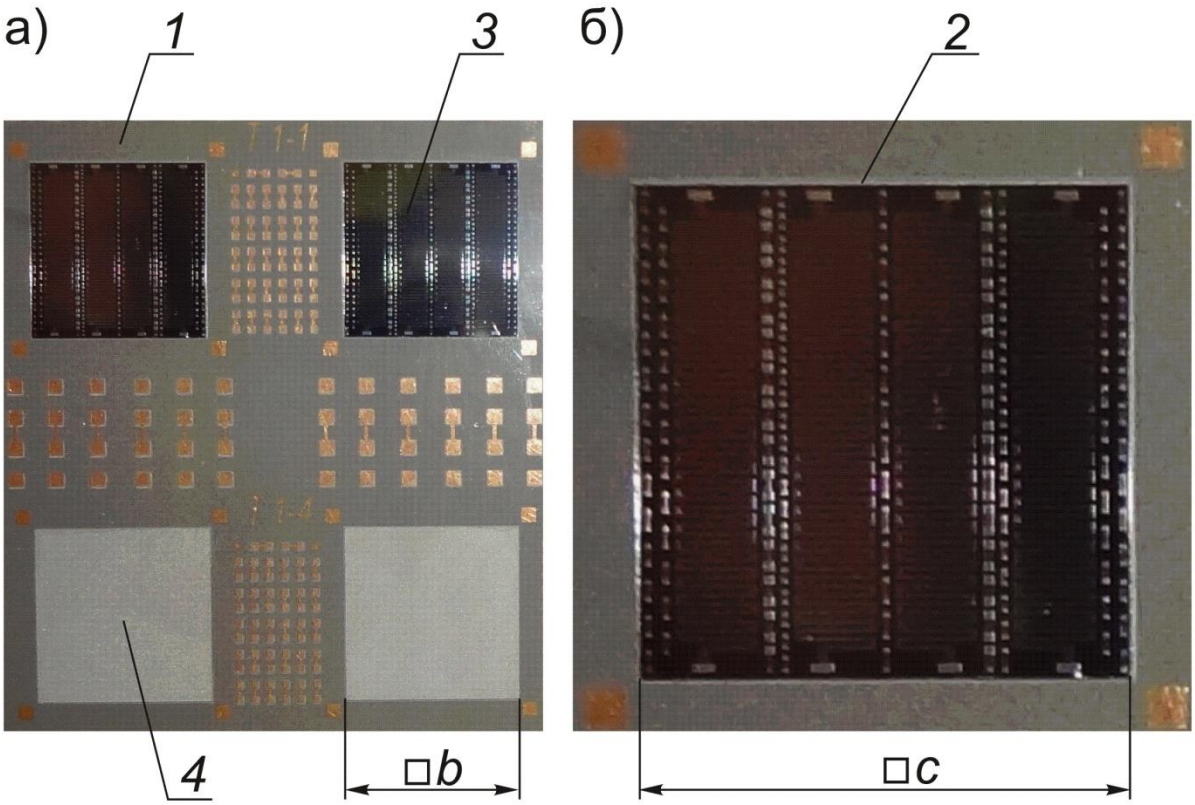


Рис.3. Образец тестовой платы с монтированными кристаллами ИС на подложку в «окно» фотополимера SU-8; а) вид сверху на плату и б) вид сверху на кристалл (увеличено): 1 – конструкционный фотополимер SU-8, 2 – зазор между кристаллом и фотополимером, 3 – кристалл, 4 – подложка из нитрида алюминия. Изображение получено при помощи цифрового USB-микроскопа с максимальным увеличением 250х

Тестовая плата была спроектирована таким образом, что зазор между кристаллом и фотополимером изменялся от 30 до 100 мкм с шагом 10 мкм.

При групповом монтаже, осуществлённом по описанному выше технологическому процессу без привлечения автоматических устройств и специальных приспособлений, точность позиционирования составила ±12 мкм.

Наилучшие результаты при монтаже кристалла на адгезив на основе эпоксидной смолы были получены для зазора между кристаллом и фотополимером равным 50 мкм.

С одной стороны минимально достижимый зазор является наилучшим конструкционным решением, но с технологической точки зрения минимально достижимый зазор затрудняет подбор дозы постоянного адгезива, поскольку отвод избытка адгезива из-под кристалла затруднён. Недостаток же адгезива приводит к тому, что зазоры остаются незаполненными и при формировании последующих изоляционных слоёв в зазорах остаются газовые полости. Следует учитывать возможности фотополимера SU-8 образовывать почти вертикальные стенки после экспонирования и проявки, что при решении проблемы подбора, дозирования и сушки постоянного адгезива, посредством которого кристаллы фиксируются в объёме МКП, может способствовать минимизации зазора до единиц микрометров. Однако при этом величина зазора должна быть согласована с погрешностью позиционирования кристаллов при монтаже.

В табл.1 приведены характеристики отработанных на данный момент способов формирования посадочных мест при монтаже бескорпусных кристаллов ИС. Анализ данных таблицы позволяет сделать вывод о перспективности рассматриваемого в статье способа внутреннего монтажа кристаллов на подложку в «окно» фотополимера.

Табл.1. Основные способы формирования посадочных мест кристаллов ИС

№	Способ формирования посадочного места кристалла	Тип посадочного места	Зазор а, мкм	Толщина кристалла, мкм	Применимость
1	Лазерная обработка [2]	В сквозное «окно», в углубление	80-120	≥75	Любой тип производства, формирование сквозных «окон»
2	Ультразвуковая абразивная обработка [2]	В сквозное «окно», в углубление	70-100	≥100	Серийное производство, групповые заготовки
3	Вакуумно-плазменное травление [2]	В углубление	100-150	25-300	Единичное производство, малые габариты кристаллов
4	Прессование/ отливка [2]	В сквозное «окно», в углубление	≥50	≥100	Серийное производство, малый теплоотвод
5	Фотолитография	В «окно» фотополимера на поверхность теплоотводящей подложки	25-75	25-75	Любой тип производства, утонённые кристаллы любых габаритов, высокий теплоотвод

Выводы

1. Геометрические параметры «окон» в изоляционном слое из конструкционного фотополимера над посадочными местами кристаллов на МКП должны выбираться исходя из толщины кристаллов, способа их монтажа, а также точности их позиционирования:

– При ручном поштучном монтаже кристаллов ИС при помощи микроскопа и вакуумного пинцета зазор между кристаллом ИС и стенкой «окна» изоляционного слоя составляет 40-80 мкм;

– При автоматизированном групповом монтаже кристаллов ИС зазор между кристаллом ИС и стенкой «окна» изоляционного слоя составляет 25-50 мкм;

– Чем толще монтируемые кристаллы, тем большим выбирается зазор между кристаллом ИС и стенкой «окна» изоляционного слоя для обеспечения равномерного выдавливания адгезива, его обезгаживания во время сушки и заполнения без полостей зазора по периметру.

Литература:

1. Конструирование радиоэлектронных средств: Учебное пособие для вузов по направлению "Авиа- и ракетостроение" по специальности "Проектирование и технология радиоэлектронных средств" / В. Ф. Борисов; Ред. А. С. Назаров; и др. – М.: МАИ, 1996 г., с. 8-16
2. Климачев И.И., Иовдальский В.А. СВЧ ГИС. Основы технологии и конструирования. - М.: Техносфера, 2006, с. 272-305.

УДК 537.58

СПОСОБМЕТАЛЛИЗАЦИИ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОДЛОЖЕК

Наталия Владимировна Баданова,
студентка 4 курса,
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Л.Л. Колесник,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Введение

Спрос на надёжные силовые полупроводниковые модули высокой мощности и приемлемой стоимости вызван развивающимся рынком силовых преобразовательных устройств: приводов, систем управления энергопотреблением, источников бесперебойного питания, импульсных источников питания, электрических транспортных средств.

Основным элементом силового модуля является металлизированная керамическая подложка, на которой расположены силовые полупроводниковые кристаллы. Подложка выполняет две основные функции:

1) Осуществляет электрическую изоляцию токоведущих шин топологического рисунка, расположенных на одной стороне, друг от друга, а также токоведущих шин на другой стороне;

2) Отводит тепло, выделяемое активными силовыми полупроводниковыми кристаллами.

Используемая для подложек керамика негигроскопична, термостойка, является изоляционным материалом с высокими механическими и электрическими свойствами. Она отличается сравнительной простотой изготовления и невысокой стоимостью. При изготовлении силовых модулей используются керамические подложки из Al_2O_3или AlN с медным слоем с обеих сторон керамической пластины.

Основными требованиями к готовому изделию являются минимальные габариты и низкая стоимость материалов и процесса производства в сочетании с высоким коэффициентом выхода годных. Кроме того решающими факторами являются высокие технические характеристики, устойчивость к воздействию окружающей среды и безотказность. Конструкция готового модуля должна обеспечивать минимальные значения переходных тепловых сопротивлений, распределенных индуктивностей силовых шин, высокое напряжение изоляции.

Основные сведения об используемом методе

Одной из ключевых технологических операций в процессе производства силовых модулей является проведение металлизации керамической подложки. Металлизация совместно с последующими операциями формирования топологии токопроводящих дорожек обеспечивает необходимую функциональность подложки в части передачи электрических сигналов между электронными компонентами, которые будут смонтированы на подложке в дальнейшем.

В данной работе в качестве основного метода металлизации будет рассмотрено термическое испарение в вакууме с доставкой молекул металла с помощью струи инертного газа.

Методы вакуумного нанесения тонкоплёночных покрытий основаны на создании направленного потока вещества и последующей конденсации его на поверхностях подложек. Процесс вакуумного нанесения покрытия можно разбить на четыре этапа:

образование потока вещества, распространение вещества от источника к подложкам, конденсация вещества на подложках, образование зародышей и рост пленки.

Осаждение тонких пленок в вакууме методом термического испарения осуществляется путем подведения к веществу энергииПри нагревании вещества(до температуры вещества равной, либо превышающей $T_{исп}$) кинетическая энергия его атомов и молекул возрастает и становится достаточной для того, чтобы они оторвались от поверхности и распространились в окружающем пространстве. С повышением температуры энергия увеличивается и количество молекул, отрывающихся от поверхности, возрастает.

Твердые вещества обычно при нагревании расплавляются, а затем переходят в газообразное состояние. Некоторые вещества переходят в газообразное состояние, минуя жидкую фазу. Такой процесс называется сублимацией.

Температуру, при которой давление паров вещества над его поверхностью составляет 10^{-2}мм рт. ст., называют температурой испарения вещества.

Скорость испарения вещества определяется количеством вещества, испаряемого с единицы площади в 1сек, и выражается формулой:

$$V_{исп} = 0{,}0585 \cdot p_s \cdot \sqrt{\frac{M}{T}} \approx 6 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{M}{T}} \qquad (1)$$

где $V_{исп}$ - скорость испарения, г/ (см^{2}сек); p_s - давление насыщенного пара (10^{-2}мм рт. ст.); М - молекулярный вес испаряемого вещества, г/моль; Т - температура испарения вещества, К.

Пленка на подложке образуется при конденсации материала. Конденсацией называется процесс перехода материала из газообразной фазы в твердую фазу.

К достоинствам метода осаждения тонких пленок термическим испарением относятся высокая чистота осаждаемого материала (процесс проводится при высоком и сверхвысоком вакууме), универсальность (наносят пленки металлов, сплавов, полупроводников, диэлектриков) и относительная простота реализации. Ограничениями метода являются нерегулируемая скорость осаждения V_o, низкая, непостоянная и нерегулируемая энергия осаждаемых частиц E.

С целью преодоления ограничений метода предлагается дополнительно использовать струю инертного газа для доставки молекул испаряемого металла к подложке. Этот способ может быть использован в вакуумных установках, оборудованных мощной системой откачки. В англоязычной литературе для похожих способов доставки материалов к подложке используются термины пароструйное или газоструйное осаждение. Метод используется для различных материалов при нанесении тонко и толстопленочных покрытий. Он показывает хорошие результаты при нанесении покрытий из многокомпонентных материалов, отличается высокой скоростью и экономичностью.

Как правило, при использовании пароструйного осаждения камеру откачивают до давления порядка 1 торр.

Основным технологическим признаком метода пароструйного осаждения является наличие сверхзвуковой струи газа, которая доставляет атомы, молекулы или даже капель материала к подложке и обеспечивает их эффективное осаждение на небольшой площади подложки. Если требуется получать покрытие на больших площадях, то необходимо организовывать взаимное сканирование подложки и источника, чтобы обеспечить полное покрытие поверхности.

Важным обстоятельством является то, что осаждение происходит в экологически чистой среде, без применения токсичных веществ и катализаторов. Во время осаждения нет необходимости нагревать подложку, ее температура остаётся близкой к комнатной.

Источники материала, применяемые для метода пароструйного осаждения, могут иметь различные варианты конструкций, но все они монтируются на фланцах, присоединенных к камере, откачиваемой до низкого вакуума. Высокоскоростной поток газа, поступающий через источники в вакуумную камеру, откачивается механическими

форвакуумными насосами или насосами Рутса, обеспечивающими скорости откачки порядка 5000…10000 литров в минуту.

В том случае, если требуется наносить многослойные покрытия, возможна комплектация установки несколькими источниками, заправленными различными материалами. В этом случае источники работают попеременно, и на подложках формируется многослойное покрытие.

Фактически метод пароструйного осаждения является комбинацией классических методов осаждения покрытий в вакууме с высокоэнергетической струёй ионизированного газа, который является транспортом, целенаправленно доставляющим материал в направлении подложки[3].

Типовой источник пароструйного осаждения предоставляет собой цилиндрическую камеру диаметром 7,62 см (3 дюйма), с выходным соплом диаметром около 1 см. Гелий, аргон или азот подается внутрь источника и поступает в вакуумную камеру через сопло.

Схема устройства источника пароструйного осаждения с термическим испарителем показана на рисунке 1[3].

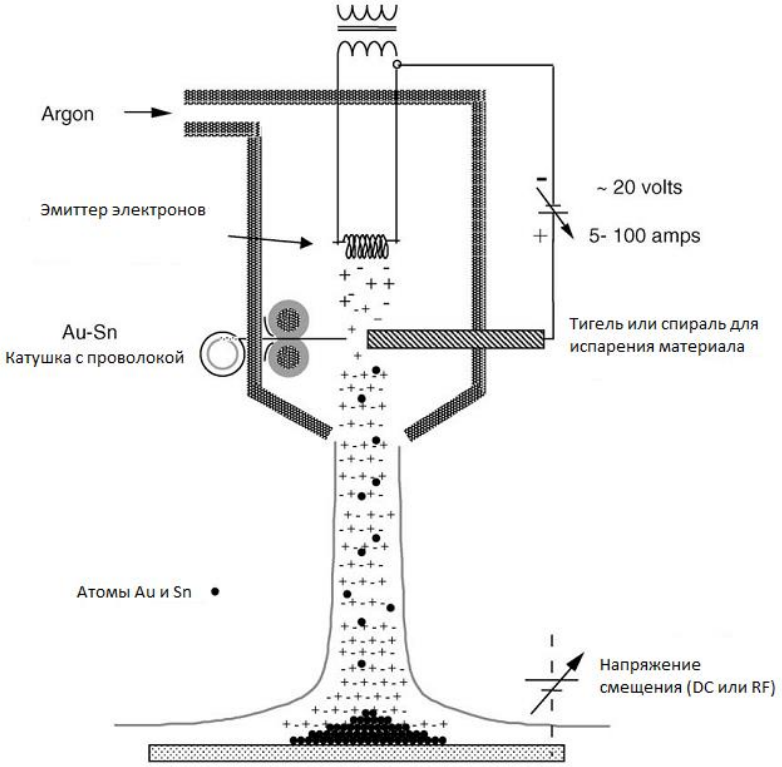


Рисунок 1 – Схема устройства источника пароструйного осаждения

Обычно давление внутри источника равно нескольким торрам, а давление в камере составляет 1 торр или менее. Точное соотношение давлений зависит от наносимого материала и требуемых свойств покрытия.

Когда соотношение давлений превышает значение 2, величина потока газа достигает критического значения и скорость газа, проходящего через сопло, достигает скорости звука. Например, для гелия при температуре 298 К скорость струи составляет около 10^5 см/с[1].

Тонкая проволока материала непрерывно подается в зону, нагреваемую с помощью тигля или спирали, сделанной из вольфрама. При контакте проволоки с нагревателем она расплавляется, смачивает спираль и начинает испаряться. Испаряющиеся атомы материала увлекаются потоком газа в сторону сопла, проходят через него со сверхзвуковой скоростью и осаждаются на подложке в виде окружности диаметром около 1 см. Распределение материала в зоне осаждения подчиняется закону Гаусса.

Одним из важных моментов в работе для реализации данного метода является сверхзвуковая струя газа, которая доставляет атомы, молекулы или даже капель материала к подложке и обеспечивает их эффективное осаждение на небольшой площади подложки. Получение интенсивных молекулярных пучковпутем использования в качестве источника аэродинамического сопла впервые было предложено Кантровицем и Грэем [2]. Их идея состояла в том,чтобы отбирать свободномолекулярный поток не изпокоящегося газа, а из газа, разогнанного в соплеконической формы

Таким образом, сопло является одним из важнейших компонентов у источников струи газа, и его геометрия будет определять основные параметры, связанные с размером струи и его интенсивности.

Сопло – это специально спрофилированный канал, который служит для разгона жидкости или газа до заданнойскорости и придания потоку определенного направления. Используя самую простую модель, для анализа течения газа в сопле принимается ряд допущений, в которых газ считается идеальным, а потокодномерным, стационарным и адиабатическим. Чтобы описать поведение газового потока в проводящемканале необходимо получить уравнение, которое связало бы скорость потока газа с площадью поперечного сечения канала. Поскольку в данной системе массовый расход газа постоянен из закона сохранения массы (уравнения неразрывности) следует:

$$\dot{m} = \rho \cdot \bar{v} \cdot S = const \qquad (2)$$

где ρ -плотность газа, v-его скорость, а S-площадь поперечного сечения сопла.

Продифференцировав обе части этого уравнения по пространственной координате x, которая является осью симметрии сопла, получим:

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dx} + \frac{1}{v} \cdot \frac{dv}{dx} + \frac{1}{S} \cdot \frac{dS}{dx} = 0 \qquad (3)$$

С другой стороны, с учетом введенных выше допущений, уравнение Эйлера запишется следующим образом:

$$v \frac{dv}{dx} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dx} \qquad (4)$$

Определим скорость звука по адиабатической сжимаемости вещества, как $c^2 = \frac{d\rho}{dp}$, где p-локальное давление. Тогда уравнение (4) примет вид:

$$v \frac{dv}{dx} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dx} \cdot \frac{dp}{d\rho} = -\frac{c^2}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dx} \qquad (5)$$

Обозначив отношение локальной скорости v к скорости звука c, как число Маха $M = \frac{v}{c}$, можно переписать (5) следующим образом:

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dx} = -M^2 \cdot \frac{1}{v} \cdot \frac{dv}{dx} \qquad (6)$$

Исключая $d\rho$ из формул (3) и (6) можно получить окончательное соотношение:

$$\frac{dS}{S} = \frac{dv}{v}(M^2 - 1) \qquad (7)$$

Это уравнение называют уравнением обращения воздействия[2]. Оно описывает закономерность изменения скорости потока от площади поперечного сечения.

Из уравнения (7) видно, что для увеличения скорости потока v ($dv>0$) при дозвуковой скорости, когда $v<c$ ($M<1$) поперечное сечение S должно уменьшаться ($dS<0$), а при сверхзвуковой скорости при $v>c$($M>1$) поперечное сечение S должно увеличиваться ($dS>0$) (см.рис.2). Движение газа со скоростью звука ($M=1$) соответствует самому узкому месту, когда площадь поперечного сечения достигает экстремума ($dS=0$) и называется критическим сечением. Таким образом, из вышесказанного можно сделать вывод, что при совмещении сходящегося и расходящегося конусов можно получить устройство, при движении по которому, газовый поток будет ускоряться до сверхзвуковых скоростей[2].

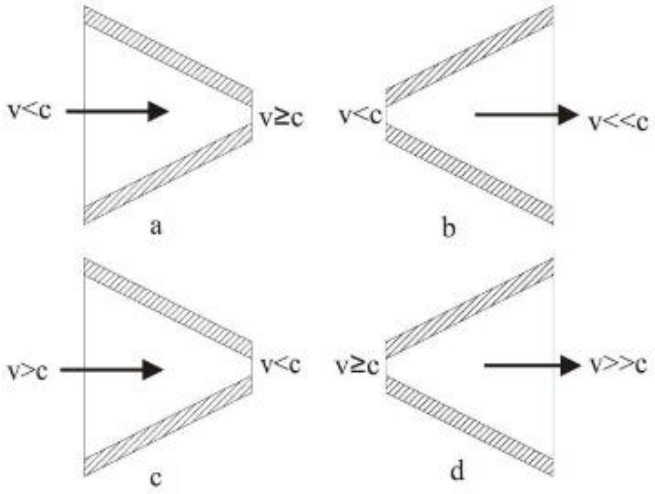


Рисунок 2 –Особенности прохождения газового потока по каналу с изменяющимся поперечным сечением

Технология нанесения покрытий методом пароструйного осаждения

Технология нанесения покрытий методом пароструйного осаждения, реализованная на стенде для проведения испытаний(см.рис.3) и заключается в следующем:

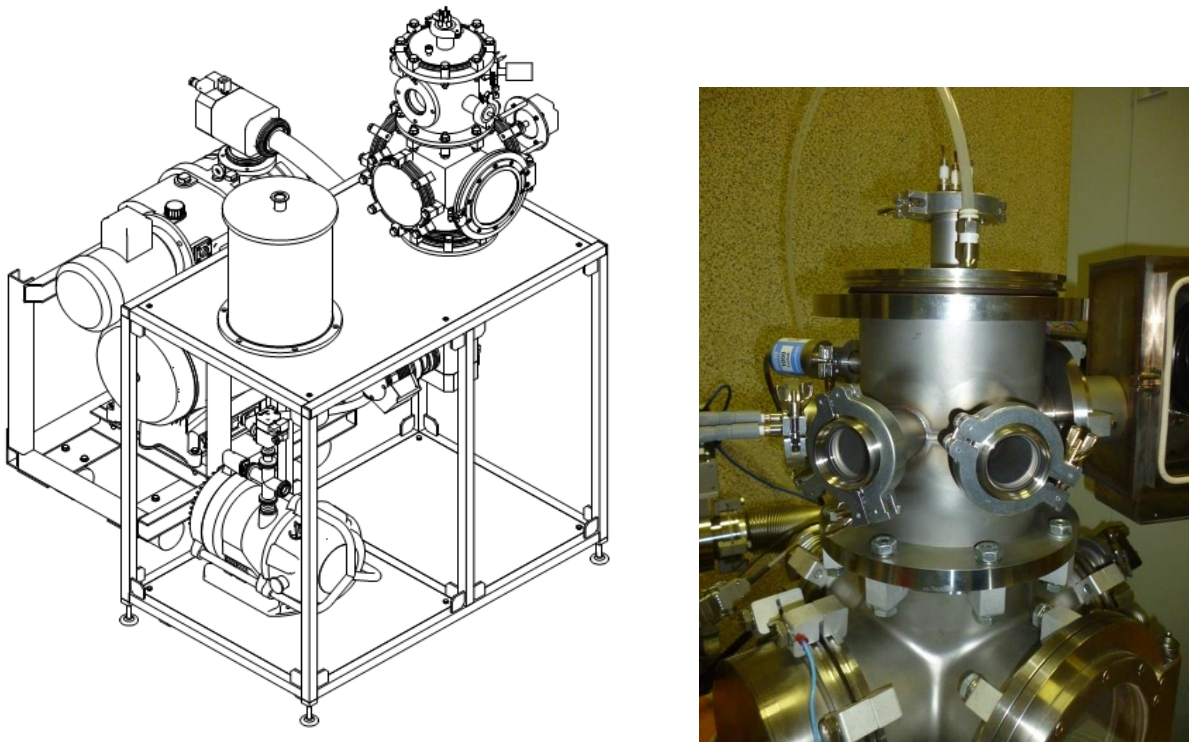


Рисунок 3 - Внешний вид стенда для проведения испытаний опытного образца источника пароструйного осаждения

1) Подготовка подложки к нанесению покрытия

Подготовка подложки к нанесению покрытия заключается в ее промывке в изопропиловом спирте. Промывка осуществляется при помощи ультразвуковой ванны «Водолей-1».

Подложка размещается в ультразвуковой ванне таким образом, чтобы обеспечить полное ее покрытие изопропиловым спиртом в процессе обработки.

Время обработки – 10 минут. После завершения обработки подложка высушивается при комнатной температуре.

Не допускается прикасаться к поверхностям подложки, на которые будет проводиться нанесение покрытия после операции подготовки подложки к нанесению покрытия.

2) Загрузка подложки в вакуумную камеру

Подложка устанавливается в вакуумную камеру на подложкодержатель при помощи специального зажима. Расстояние от сопла источника до подложкодержателя должно быть равно 51 мм.

После загрузки подложки в вакуумную камеру закрыть дверь вакуумной камеры.

3) Загрузка испаряемого материала

Катушка с испаряемым материалом устанавливается в камеру подачи материала. После загрузки проволоки закрыть дверь камеры подачи материала.

4) Откачка вакуумной камеры, источника и системы подачи материала

До начала процесса нанесения покрытия необходимо откачать вакуумную камеру, источник и камеру подачи материала до давления не выше 10^{-3}мбар.

5) Включение газовой системы и установка режима подачи газа

Включить систему подачи газа. Расход газа должен быть таким, чтобы обеспечить давление в источнике не ниже 20 мбар, давление к камере не выше 2 мбар. Чем больше перепад давлений между камерой и источником, тем больше будет плотность получаемого покрытия и его адгезия к подложке.

В ходе проведения экспериментов использовалась подача газа с расходом в 300 sccm. Давление в источнике при этом составило 27 мбар.

6) Включение испарителя и установка режимов испарения

Так как при термическом испарении основным параметром является мощность, подводимая к испарителю, то необходимо использовать режим постоянной мощности.

Нанесение покрытий меди проводилось при мощности 750 Вт, титана – 1250 Вт.

7) Включение системы подачи испаряемого материала

Включение системы подачи испаряемого материала заключается в установке скорости подачи и подаче питания на двигатель.

При нанесении покрытий использовалась подача материала со скоростью 0,3 оборота в минуту.

8) Нанесение покрытия

В случае относительного взаимного сканирования источника и подложки время нанесения покрытия на всей поверхности подложки слоем материала толщиной h мкм будет определяться как

$$t_o = h \cdot t_o \cdot S_{подл} / S_{пятна} \qquad (8)$$

где h – требуемая толщина покрытия в мкм; t_o – время осаждения покрытия толщиной 1 мкм на запыляемом пятне без сканирования источника относительно подложки, $S_{подл}$ – площадь подложки, $S_{пятна}$ – площадь запыляемого пятна при неподвижном источнике.

9) Выключение испарителя и системы подачи испаряемого материала

10) Выключение газовой системы

11) Отключение системы откачки

Отключение системы откачки необходимо производить не ранее, чем через 5 минут после отключения испарителя, чтобы избежать его окисления, охрупчивания и разрушения.

12) Напуск атмосферы и выгрузка подложки из вакуумной камеры

В таблице 2 приведен список режимов, при которых производились эксперименты.

Таблица 2.

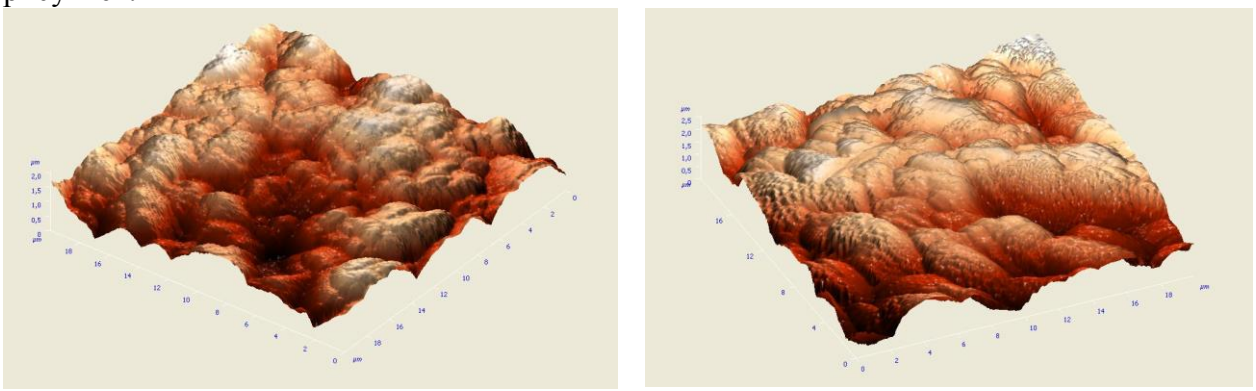
Подложка	AlN	AlN	AlN	AlN
Ток испарителя, А	14	14	10	28
Время нанесения,сек	1157	659	1020	215
Расстояние сопло-подложка, мм	51	51	51	51
Мощность для подачи материала , кВт	0,15	0,15	0,12	0,3
Наносимый материал	Cu	Cu	Cu	Cu
Подача газа Ar,sccm	300	300	150	0

Исследование образов покрытий, полученных методом пароструйного осаждения

В ходе выполнения работы исследованию были подвергнуты контрольные образца керамики с металлизацией медью, выполненной методом пароструйного осаждения.

Образцы были просканированы на атомно-силовом микроскопе с целью определения структуры пленки. Кроме того, были проведены измерения адгезии методом отрыва.

Внешний вид пленки, полученной на атомно-силовом микроскопе, представлен на рисунке4.



а) б)

Рисунок 4 – Внешний вид пленки, полученный сканированием образца на атомно-силовом микроскопе; размер скана 20х20 мкм.а – край подложки, б – центр подложки

Анализ изображения показал, что пленка обеспечивает полное покрытие поверхности подложки. Обладает равномерной плотной структурой. Не имеет явно выраженных посторонних дефектов и включений.

Измерения адгезии проводились с использованием адгезиметраElcometr 106. АдгезиметрElcometer 106 представляет собой удобный в использовании и портативный прибор, дающий числовые значения величины адгезии. Внешний вид прибора предоставлен на рисунке 5.

Методика определения адгезии заключается в следующем. Грибок наклеивается на покрытие с использованием клея. Адгезиметр оснащен пружинным устройством, прилагающим отрывное усилие к грибку. При отрыве грибка от поверхности, индикатор на шкале показывает численную величину адгезии, выраженной в силе, требуемой для отрыва грибка. Испытание проводится, начиная с усилия 0,05…0.2 Н/мм^2 до 5…22 Н/мм^2. Для получения приблизительной величины в кг/см^2 необходимо увеличить величину в Н/мм^2 в 10 раз.



Рисунок 5 – Внешний вид прибора, использовавшегося для измерения адгезии



Рисунок 6 – Образцы металлизированных подложек перед проведением измерения величины адгезии

В таблице 3 представлены результаты опыта.

Таблица 3- Сила отрыва (разрушения) в пересчете на 1 кв.мм, кгс.

№ платины				Характер разрушения
1	2	3	4	
	6,5	5,5	7,5	По покрытию
	6,5	4,0	4,0	
	4,5	7,0	7,5	
	6,0			
	6,0			
6,0		6,1	3,0	По керамике
6,0		8,0	3,5	

По результатам измерения адгезия пленок к подложке для всех представленных образцов составила более 7 МПа. При максимально возможной нагрузке, реализуемой прибором, разрушения пленки не произошло. При измерениях разрушился клеевой слой, которым грибок был приклеен в пленке.

Проведенные измерения позволяют говорить о высоких значениях адгезии и полном покрытии пленкой подложки при использовании для нанесения метода пароструйного осаждения.

Литература

1. Демихов К.Е., Панфилов Ю.В. Вакуумная техника: справочник.-М.: Машиностроение, 2009. 590 с.

2. Карпенко А.Ю., Батурин В.А. Источники кластерного пучка. Часть 2. Формирование кластерных пучков в сопловых источниках.// JOURNAL OF NANO- AND ELECTRONIC PHYSICS.-2012,Т.4.- №4.
3. US. Patent 5571332 – Electron Jet Vapor Deposition System, 1996

УДК 621.396.6:621.315.6

ПЛАНАРИЗАЦИЯ ПОДЛОЖЕК ИЗ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ

Анастасия Александровна Тюлькова, Алексей Валерьевич Кузовков,
студенты 3 курса
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»,
Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Ю.С. Боброва,
Ассистент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Современные радиоэлектронные устройства, предназначенные для радиолокации, передачи данных, измерения расстояний по скорости и времени прохождения радиоволн и т.п., требуют рассеивания значительных тепловых мощностей. Плотность рассеиваемой мощности интегральных схем (далее – ИС) в таких устройствах может достигать 100 Вт/см^2. Для её эффективного отвода от ИС следует использовать металлокерамические подложки на основе нитрида алюминия (далее – AlN), который имеет ряд преимуществ перед другими керамическими материалами:

– AlN обладает высокой, сопоставимой с алюминием, теплопроводностью – от 160 до 200 Вт·м$^{-1}$·К$^{-1}$;

– Коэффициент температурного расширения (далее – КТР) у AlN согласован с КТР полупроводниковых материалов подложек ИС (кремния, арсенида и нитрида галлия) – 6,2·10^{-6}/°С при 100–500°С;

– AlN характеризуется высоким значением напряжением пробоя и электрической прочностью – до 15 кВ/мм;

– Прочность AlN на изгиб – до 240 МПа.

Таким образом, совокупность высоких тепло- и электрофизических характеристик металлокерамики из AlN, а также возможность её эксплуатации при сохранении работоспособности в широком температурном диапазоне, позволяют сделать вывод о целесообразности её использования в качестве материала основания теплонагруженных микрокоммутационных коммутационных плат (далее – МКП), изготавливаемых по тонкоплёночной технологии.

Однако, в отличие от используемой до сих пор алюмооксидной керамики (далее – Al_2O_3), чистота поверхности которой после полирования достигает 13-14 класса (рис. 1, Rz до 0,032 мкм), бюджетные заготовки из AlN имеют класс чистоты поверхности не выше 8 (Rz до 2,5 мкм) и требуют дополнительно комплекса мер по улучшению качества поверхности (рис. 2).

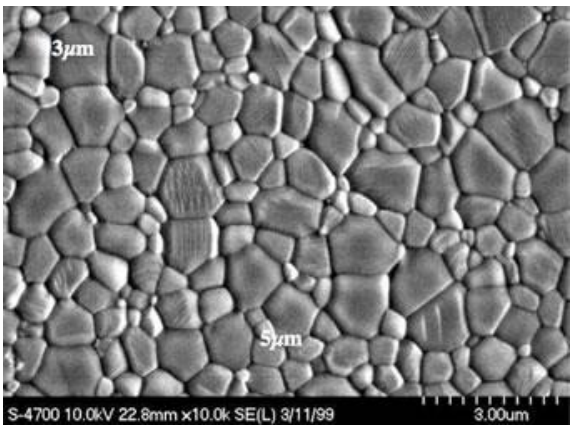


Рис. 1. Поверхность подложки Al_2O_3 класса чистоты 13 (изображение получено при помощи электронного-сканирующего микроскопа)

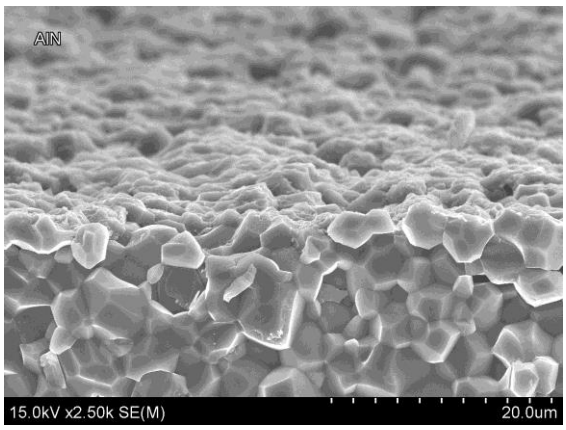


Рис. 2. Поверхность и срез подложки AlN класса чистоты 8 (изображение получено при помощи электронного-сканирующего микроскопа)

Механическая планаризация поверхности бюджетных заготовок AlN приводит к тому, что зерна AlN выкрашиваются, имея силу сцепления между собой меньшую, чем та, что прикладывается во время тонкого шлифования. Размер зерен слишком велик (от 2,5 до 5 мкм), а взаимная диффузия между ними недостаточная (рис. 3), чтобы посредством механической планаризации можно было получить поверхность, удовлетворяющую требованиям тонкоплёночной технологии.

Обзор способов планаризации показал, что существует ряд методов, позволяющих снизить шероховатость металлокерамической подложки AlN за счёт нанесения различных выравнивающих покрытий, которые затем могут быть сошлифованы и отполированы так, что впадины между зернами AlN окажутся заполненными.

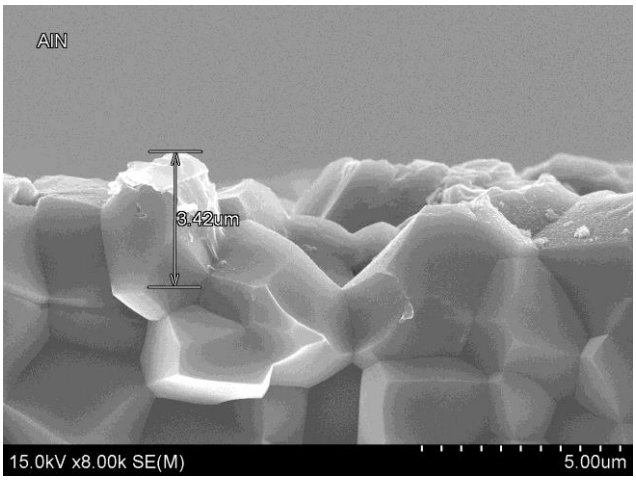


Рис. 3. Подложка AlN 8-го класса чистоты поверхности. Размер и форма зерен AlN (изображение получено при помощи электронного-сканирующего микроскопа)

В данной работе рассмотрены способы снижения шероховатости бюджетных подложек из AlN, посредством нанесения следующих планаризующих покрытий:

- легкоплавкое стекло;
- «жидкое» стекло (SOG-материал);
- полимер SU-8.

Планаризация поверхности подложек из нитрида алюминия с помощью легкоплавких стекол

Для планаризации подложек AlN можно использовать легкоплавкие стекла, используемые для защиты p-n переходов в технологии производства ИС. Температура

размягчения таких стекол 500–600°С, температура плавления 800–1100°С, что позволит подвергать подложки и наносимые на них функциональные слои отжигу при 400–500°С.

Возможные составы стекол [1]:

Состав 1. Для защиты кремниевых приборов используют порошкообразное стекло, состоящие из 50% окиси свинца, 40 % окиси кремния и 10% окиси алюминия, а для защиты германиевых приборов – 60% окиси свинца, 30% окиси кремния и 10% окиси алюминия. Состав приготавливают из суспензии в дистиллированной воде, наносят на поверхность кристалла и сплавляют при температуре 1000°С. Наносят стекло методами центрифугирования, седиментации суспензии или осаждения из паровой фазы.

Состав 2. Боратное стекло – более перспективное, так как отличается низкой электропроводностью и малыми диэлектрическими потерями, высокой механической прочностью, а также термической и климатической стойкостью. Боратное стекло имеет структуру, отличающуюся от структуры силикатных стёкол, и способно выдерживать умеренные концентрации катионов (например, натрий до 0,1%), не увеличивая электропроводимость. Боратное стекло отвечает требованиям герметизации полупроводниковых приборов: свободно от щелочных металлов, уплотняется (спаивается) при температуре до 800 °С, относительно инертно и водонепроницаемо, имеет регулируемые коэффициенты температурного расширения.

Боратные стёкла состоят из бората цинка, окиси цинка, окиси кадмия, окиси алюминия, окиси кремния. Кроме того, они могут включать окись бериллия и в небольших окись титана, циркония, ниобия, лантана, церия, скандия, гафния, галлия, индия и их смеси. Эти составы стойки к расстёклыванию в широком диапазоне температур и обладают полной смешиваемостью составных частей.

В качестве примера можно привести следующий состав стекла этого типа: 22–25 % окиси кремния, 32–38% бората цинка, 12–20% окиси алюминия, 15–30% окиси цинка. Такое стекло обладает коэффициентом температурного расширения, равным $38 \cdot 10^{-7}$/°С в диапазоне температур от 20 до 200°С. Толщина плёнки стекла от 1 до 20 мкм.

КТР боратного стекла ($38 \cdot 10^{-7}$/°С в диапазоне 20–200°С) близок к КТР нитрида алюминия ($4.6 \cdot 10^{-6}$/°С при 20–300°С), что является гарантией нормальной работы подложек с покрытием в диапазоне рабочих температур (20–100°С).

Наиболее благоприятные результаты по однородности защитных плёнок могут быть получены при использовании в качестве жидкого компонента жидкости, имеющей диэлектрическую постоянную в интервале от 6 до 12. В качестве примера можно рекомендовать смесь, состоящую из 10 $см^3$ изопропилового спирта, 3 $см^3$ вторичного бутилового спирта, 64 $см^3$ третичного бутилового спирта, 23 $см^3$ бензина, и имеющую диэлектрическую постоянную равную 10.

Сплавление стеклянных частиц с поверхностью планаризуемого материала происходит в течение 5-10 минут при температуре на 25–80°С выше температуры размягчения стекла. После сплавления на поверхности образуется однородная, свободная от пор, тонкая стеклянная плёнка.

Планаризация подложек нанесением слоя жидкого стекла

Применение жидких spin-on-glass (SOG) стёкол в качестве планаризующих покрытий выглядит перспективным вариантом снижения шероховатости подложек в силу простоты технологического процесса.

Современный SOG-материал представляет собой раствор, состоящий из пяти компонентов [2]:

– тетраэтоксисилан – основа для формирования Si-O каркаса плёнки;

– бутанол – растворитель;

– пролипропиленгликоль – регулятор вязкости;

– триметилсилилфосфат – легирующая добавка, способствующая увеличению стойкости плёнки к растрескиванию при высоких температурах;

– раствор азотной кислоты в деионизованной воде – стабилизатор раствора.

Формирование SOG-слоя производится золь-гель методом и включает несколько этапов. Раствор наносят на подложку методом центрифугирования, что обеспечивает высокую однородность слоя по толщине. В зависимости от вязкости раствора и скорости вращения подложки можно получать плёнки толщиной 50–500 нм. Типичные значения скорости вращения подложки для данной операции составляют 1500–4000 об/мин, а длительность операции – 20–30 с. Далее нанесённый слой подвергается сушке при 150–200˚С и окончательной термообработке при 400–450 ˚С в течение 30 минут.

В процессе термообработки происходит усадка плёнки на 2–15%, приводящая к возникновению внутренних напряжений до 200 МПа, которые в свою очередь могут привести к растрескиванию полученного слоя. Для предотвращения данного эффекта в исходный раствор вводятся легирующие добавки.

По завершении технологического процесса на поверхности подложки формируется Si-O каркас (рис. 4). В случае наличия легирующей добавки в полученной структуре присутствуют включения фосфора (Рис. 5), при этом стойкость плёнки к растрескиванию возрастает за счёт появления двойных связей P=O.

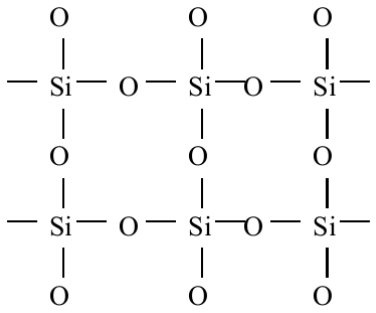


Рис. 4. Структура чистого SOG-слоя

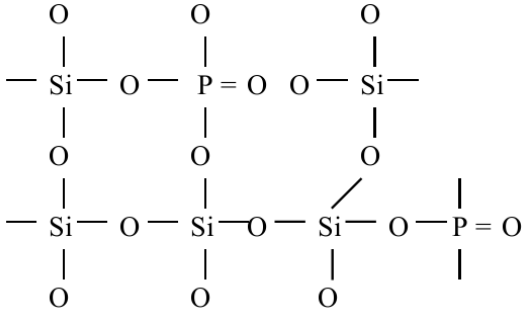


Рис. 5. Структура легированного SOG-слоя

В зависимости от количественного соотношения компонентов в исходном растворе, полученная плёнка может иметь различные электрические, механические и термические характеристики. Таким образом, относительная диэлектрическая проницаемость может меняться в диапазоне от 2.6 до 4.0, а коэффициент термического расширения – от $1 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-6}$ $К^{-1}$, что согласуется с КТР нитрида алюминия.

Планаризация поверхности плёнкой SOG позволяет достичь шероховатости

Rz = 0.05 мкм (14-й класс чистоты), что показано в работе [3].

Совокупность представленных выше данных позволяет рассматривать SOG-материалы, как перспективное средство для снижения шероховатости поверхности подложек AlN с низким классом чистоты поверхности.

Планаризация поверхности подложек из нитрида алюминия с помощью фоторезиста SU-8

Планаризация подложек из AlN с помощью фоторезиста SU-8 теоретически возможна, поскольку SU-8 обладает свойствами, делающими его привлекательным для использования в качестве структурных и диэлектрических материалов и покрытий. Во-первых, из него на традиционном оборудовании за один технологический проход можно формировать слои толщиной 2–1000 мкм. Во-вторых, он обладает исключительной оптической прозрачностью, что делает возможным проведение четкой регулировки нанесения следующих слоев литографическим методом. В-третьих, конечная полимерная структура с большим количеством поперечных связей обладает высокой химической устойчивостью и хорошими температурными характеристиками, позволяющими выдерживать технологические процессы с температурами, превышающими 250 °С. И, наконец, SU-8 обладает отличными механическими свойствами. В таблице 1 приведены некоторые механические, физические и электрические свойства SU-8 [4].

Табл. 1. Основные свойства SU-8

№ п/п	Характеристика	Значение	Примечание
1	Модуль упругости E, ГПа	4, 95 ±0,42	Процесс спекания при 200 °C, тест деформации балки
2	Коэффициент Пуассона	0,22	Процесс спекания при 95 °C
3	Температура стеклования T_g	≈ 55	Для пленки, не подвергавшейся облучению (без образования полимерных связей)
4	Температура стеклования T_g, °C	> 20	Для полностью полимеризованной пленки (после процессов облучения и спекания при 200°C)
5	Температура разрушения T_g, °C	≈ 380	Для полностью полимеризованной пленки (после процессов облучения и спекания при 200°C)
6	Коэффициент теплового расширения, $(P_{pm}$ (промиль)°C$)^{-1}$	52,0 ±5,1	Процесс спекания при 95 °C
7	Теплопроводность, $Вт \times м^{-1}К^{-1}$	0,2	Приведено значение типичное для всех полимеров SU-8
8	Усадочная деформации	0,075	Процесс спекания при 95 °C
9	Относительная диэлектрическая проницаемость ε при 10 МГц	3–4	Процесс спекания при 100 °C

КТР фоторезиста SU-8 больше КТР AlN ($52{,}0 \cdot 10^{-6} > 38 \cdot 10^{-7}$, 1/°C), что обеспечивает согласованную работу покрытия и подложки в диапазоне температур 20–100°C.

Были проведены эксперименты по планаризации подложек из AlN с помощью фоторезиста SU-8 с добавлением порошка SiO_2 с размерами частиц 25-90 нм в различных соотношениях. Выдвинулось предположение, что добавление порошка диоксида кремния увеличит твердость пленки фоторезиста.

Для проведения эксперимента были созданы 2 состава с различным объемным соотношением фоторезиста и частиц диоксида кремния:

1) SU-8: SiO_2 = 1:1
2) SU-8: SiO_2 = 5:1

Смеси были нанесены на подложки из AlN и высушены при последовательном нагреве при 70 и 100°C и проэкспонированы УФ-излучением в течение 120 с.

Заготовка с нанесенным покрытием из чистого SU-8 была высушена при последовательном нагреве при 70 и 100°C и проэкспонирована УФ-излучением в течение 360 с.

Были проведены изменения твердости полученных образцов на микротведометре ПМТ-3М (табл. 2).

Табл. 2. Результаты измерения твердости планаризующих покрытий на основе SU-8

№ опыта	1	2	3	Средняя твердость
SU-8:SiO_2 = 1:1	116,246HV	129,521HV	119,366HV	121,711HV
SU-8:SiO_2 = 5:1	118,759HV	107,585HV	104,912HV	110,418HV
SU-8	133,151HV	133,151HV	133,151HV	133,151HV

В проведенном эксперименте, твердость покрытий из смеси SU-8 и SiO_2 (1:1) незначительно меньше твердости покрытия из чистого SU-8. Это может быть объяснено

тем, что время УФ-задубливания чистого фотополимера SU-8 было в 3 раза большим. Но даже при недостаточном времени УФ-задубливания покрытие из смеси SU-8:SiO_2 1:1 имеет большую твердость, чем покрытие из смеси SU-8:SiO_2 5:1.
Подбор правильного времени УФ-задубливания должен привести к подтверждению первоначального предположения о том, что введение в SU-8 нанопорошка SiO_2 повышает твердость планаризующего покрытия.

Выводы

1. Планаризация подложек AlN с помощью легкоплавких стекол может сделать возможным последующее нанесение функциональных слоев, требующих отжига при температурах 400-500°С. Однако этот метод требует дополнительного оборудования (печей, сушильных шкафов).
2. Использование жидких стёкол SOG позволяет достичь шероховатости поверхности подложки, удовлетворяющей требованиям тонкоплёночной технологии (Rz=0,032 мкм).
3. Нанесения в качестве планаризующего покрытия фоторезиста SU-8 технологично и не требует дорогостоящего оборудования. Диапазон рабочих температур изделий – до 250°С. Добавление наноразмерных порошков диоксида кремния влияет на его механические свойства (повышается твердость).

Литература

1. http://www.telogik.ru/study-27-23.html
2. В.А. Пилипенко, В.Н. Пономарь, В.А. Горушко, В.В. Понорядов, Н.С. Кускова, А.В. Демьянович. Планаризация межуровневого диэлектрика с использованием жидкого стекла [Текст] / В.А. Пилипенко, В.Н. Пономарь, В.А. Горушко, В.В. Понорядов, Н.С. Кускова, А.В. Демьянович // Вестник БГУ. – 2005 г. – № 3. – С. 32-36.
3. Nguyen Nhu Toan. Spin-on glass materials and applications in advanced IC technologies.- The Netherlands, Enschede : University of Twente, 1999. – 148 с.
4. http://micromachine.narod.ru/su-8.htm

Секция XII

Лазерные технологии в машиностроении

Председатель: **Григорьянц Александр Григорьевич**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Лазерная техника и технология» (МТ-12)

Ученый секретарь: **Богданов Александр Владимирович**
кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерная техника и технология» (МТ-12)

УДК 621.375.826

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОПОРОШКОВОГО ПОТОКА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАСАДОК

Роман Дмитриевич Асютин,
студент 4 курса,
кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.Я. Ставертий,
ассистент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении»

Распределение частиц порошка в газопорошковом потоке является важным параметром, влияющим как на производительность процесса, так и на его качество. При постоянных расходах газов и порошка распределение является стационарным и зависит от многих факторов: размера частиц, их формы, плотности их материала, из которого они состоят. Например, частицы сферической формы принимают скорость газа и переносятся в ламинарном потоке. Частицы неправильной формы перемещаются более разрозненно, поток порошка таких частиц нестационарен. Было выявлено, насколько отличаются «рабочие конусы», образованные газопорошковыми потоками тех или иных частиц, на различных соплах, чтобы установить оптимальные для каждого материала. Поскольку форма частиц напрямую зависит от технологии их получения, то данное исследование дало возможность установить также требования к способу получения порошков.

Для исследования этого комбинированного параметра, зависящего как от расхода газа, типа газа, так и от формы и размеров частиц, был создан лабораторный стенд (рисунок 1.1). Стенд состоит из технологической головы (1), неподвижного источника света щелевого типа (4), видеокамеры (1). Источник света представляет из себя диодный светильник зеленого света со светимостью 2000 Лм. Светильник создает излучение зеленого цвета, выходящее через специальную щель в корпусе. Ширина щели составляет 2 мм. Ширина луча, освещающего поток порошка – тоже 2 мм, поскольку поток ссыпается непосредственно возле щели, и расходимостью луча пренебрегаем по причине его малости.

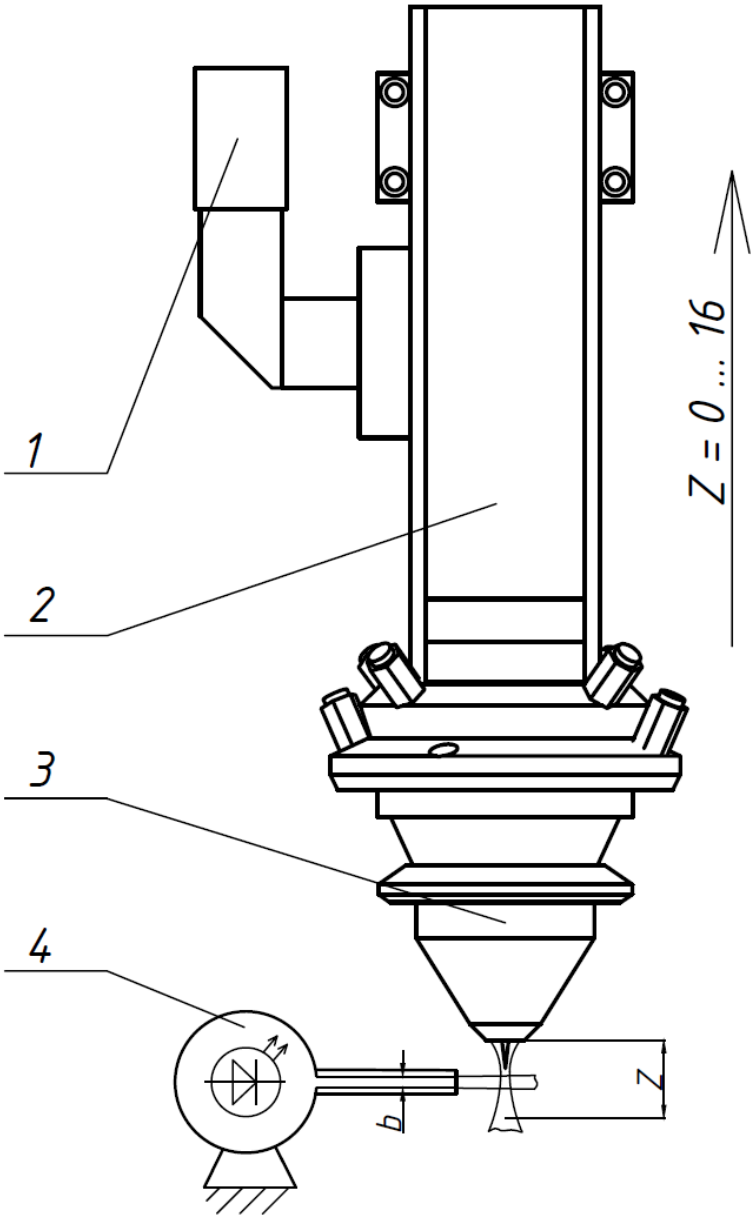


Рисунок 1.1 - Схема стенда для измерений газопорошкового потока по сечениям

Способ подачи порошка в общем случае влияет на время его пребывания при высоких температурах, и, как следствие - на формирование ванны и свойства металла после кристаллизации. Кроме того, в зависимости от конструкции насадки, скорость частиц порошка может изменяться в широких пределах [1, 2, 3]. Температура частиц при этом тоже значительно меняется. Например, при малых скоростях потока и длинных сопловых насадках, порошок перегрет под лучом, часть легкоплавких легирующих элементов может выгореть ещё до образования общей ванны расплава. Некоторые элементы, такие как карбиды кремния и вольфрама, поглощают излучение определенной длины волны практически полностью и часто сгорают до попадания в покрытие. В связи с этим, необходимо подавать их под наиболее тупым углом к подложке, сводя время пребывания под лучом к минимуму.

Выделяют несколько основных способов подачи порошковых материалов в зону лазерного воздействия: боковая подача, многоструйная и коаксиальная подача порошка. В данной работе рассматриваем два способа подачи порошков: коаксиальный и четырехструйный.

Многоструйная подача (MultiJet), рисунок 1.2. Подача из нескольких трубочек является развитым методом боковой подачи, обеспечивает симметрию подачи порошка относительно направления движения. Обычно в конструкциях таких головок используют 4 трубочки, расположенных осесимметрично (рисунок 1.3). На выходе из трубочек частицы порошка имеют скорость выше, чем при других способах подачи. Как результат, такой метод подачи не чувствителен к направлению передвижения относительно подачи порошка и допускает наклон головы в широких пределах, до 45 градусов от вертикали. Это упрощает обработку крупногабаритных деталей без их перемещения в пространстве. Недостатком схемы является сравнительно низкая эффективность использования порошковых материалов относительно коаксиальной схемы подачи порошка (рисунок 1.4).

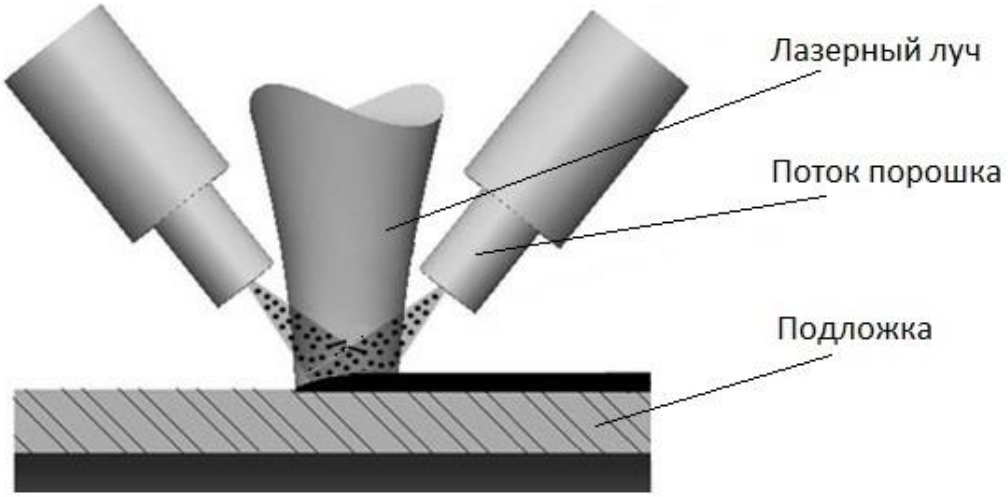


Рисунок 1.2 - Схема наплавки с многоструйной подачей порошковых материалов



Рисунок 1.3 - Четырехструйное сопло



Рисунок 1.4 – коаксиальное сопло

Коаксиальная подача (рисунок 1.5) - это метод для обработки деталей более аккуратным способом, чем при многоструйной подаче. Помимо осесимметричности пучка, такой метод позволяет получить наиболее тонкий газопорошковый поток, позволяющий наносить валики шириной от 200 - 300 мкм. Диаметр лазерного луча может составлять не более 0,3 мм, а эффективность использования порошка может достигать 70%, чего не обеспечивают методы с многоструйной подачей. Такие технологические параметры позволяют обрабатывать очень чувствительные к перегреву, тонкостенные детали с минимальным тепловым воздействием и высоким качеством наплавленного слоя.

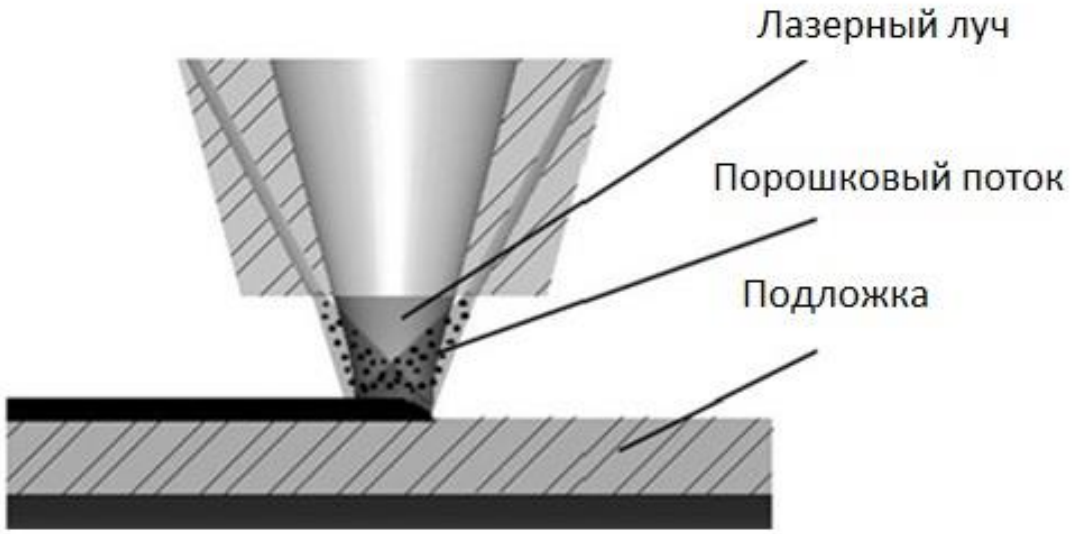


Рисунок 1.5 - Схема наплавки с коаксиальной подачей порошковых материалов

Исследование влияния формы и размеров частиц порошка

В данной работе представленно исследование способа подачи порошковых материалов различных формы, состава и размера частиц. В таблице 1.1 указаны основные параметры порошковых материалов, важные для технологии. Рассматривался ряд порошковых материалов, используемых для создания композиционных покрытий. В случае создания покрытий из комбинации порошковых материалов, необходимо знать поведение отдельных составляющих при их подаче тем или иным методом, с помощью сопел различной геометрии.

Таблица 1.1 - параметры порошков, исследованных в работе.

Марка	Размер частиц	Плотность материала, г/см^3	Форма частиц
Al12Si	-80 +50	2,5	Овальные, с сателлитами
SiC	-100 +83	3,2	Колотые

Порошковый материал Al12Si – алюминиевый сплав, используемый для ремонта деталей из алюминиевых сплавов, а также для получения композиционных материалов типа Al12Si – SiC, обладающих высокой износостойкостью при низком удельном весе. Порошок имеет частицы сферической формы, с наличием небольшой доли сателлитов и частиц неправильной формы.

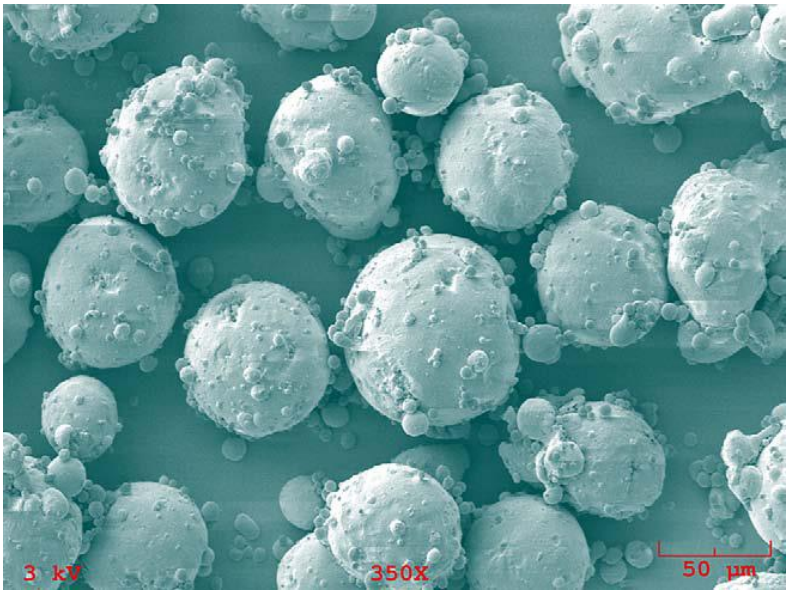


Рисунок 1.7 – Частицы порошка Al12Si, фото производителя

Порошковый материал SiC – химически чистый карбид кремния, получают дроблением кристаллов и дальнейшим рассевом по фракциям. К отличительным свойствам необходимо отнести высокую температуру плавления, высокую твердость (зависит от кристаллической решетки и способа получения), высокую химическую стойкость при температурах до 1500 градусов Цельсия. Внешний вид порошковых частиц представлен на рисунке 1.8. Размер фракций карбида кремния, рассмотренный в данном исследовании – от 83 до 100 мкм. Частицы имеют преимущестенно колотую форму.

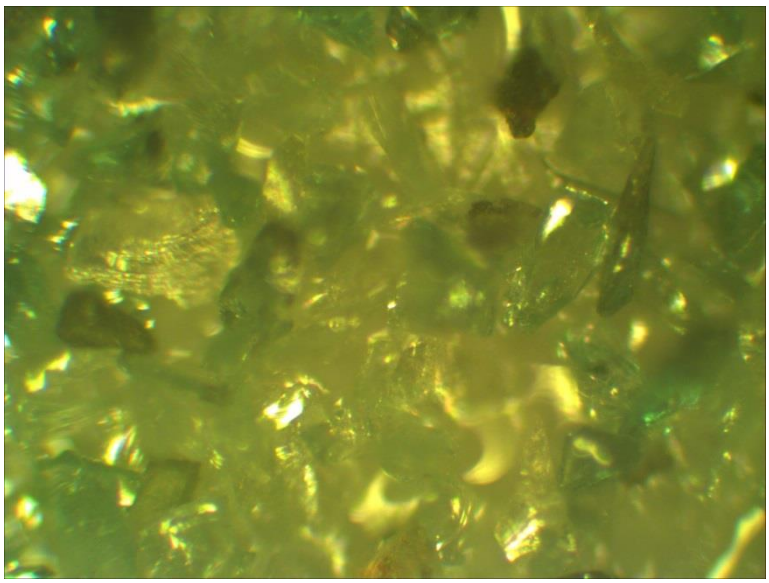


Рисунок 1.8 – Частицы порошка SiC, увеличение 100 крат

Описание оборудования

В данной работе использовалась технологическая голова для наплавки с фокусным расстоянием линзы 200 мм. Голова позволяет устанавливать различные модули для подачи порошковых материалов коаксиально (рисунок 1.9) и с помощью четырех струйной подачи (рисунок 1.10).

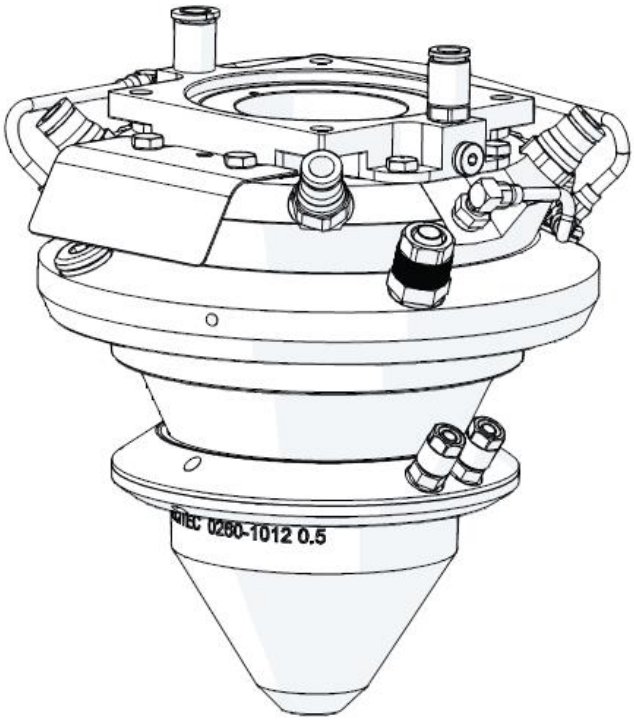


Рисунок 1.9 - модуль для коаксиальной подачи порошковых материалов

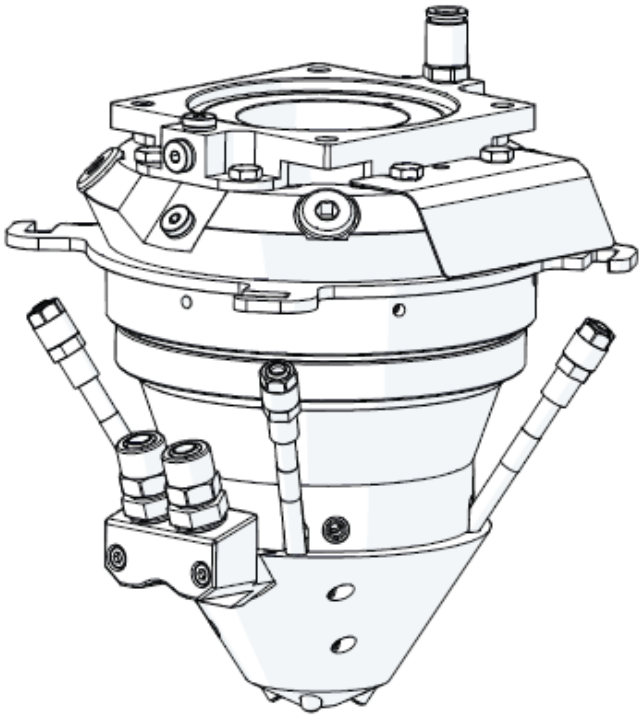


Рисунок 1.10 - модуль для четырехструйной подачи порошковых материалов

Порядок измерений

Исследуемый порошок подается в технологическую голову с помощью порошкового питателя необходимым газом: аргоном, азотом или гелием.

Технологическая голова расположена вертикально. Выходящий из нее порошковый поток подсвечивается специальным образом и регистрируется камерой. В результате на ней отображаются только те частицы, которые пролетают в данном сечении газопорошкового потока. Перемещая голову ступенчато вдоль оси и последовательно регистрируя такие изображения, получаем картину распределения частиц в газопорошковом потоке.

Зная масштаб изображений, можем получить с приемлемой для технологии точностью такие параметры газопорошкового потока как фокусное расстояние технологической оснастки по порошку, минимальный диаметр газопорошкового потока, размер «перетяжки» той или иной оснастки, относительную плотность частиц газопорошкового потока в различных его сечениях. На рисунке 1.11 указаны наиболее важные параметры газопорошкового потока:

Lo – расстояние, на котором после вылета из сопла газопорошковый поток смыкается, образуя сплошную фигуру без отверстия в центре, если рассматривать сечение.

Zmin – расстояние, на котором диаметр потока имеет минимальный диаметр, а следовательно, максимальную плотность. Обычно данное расстояние рассматривают как рабочее, с максимальным коэффициентом использования порошка.

Lrab – зона потока, наплавка в которой обеспечивает формирование стабильного валика, без перегрева порошковых частиц и с оптимальным коэффициентом порошкового материала.

Dmin – минимальный диаметр газопорошкового потока, достигаемый в данном сопле при использовании данного порошка. Этот диаметр характеризует возможность получения валиков минимальной ширины с эффективным использованием порошка.

Перечисленные параметры необходимы для эффективного назначения конкретной насадки в определенной технологии обработки. Размер перетяжки, например, влияет на стабильность процесса нанесения покрытия.

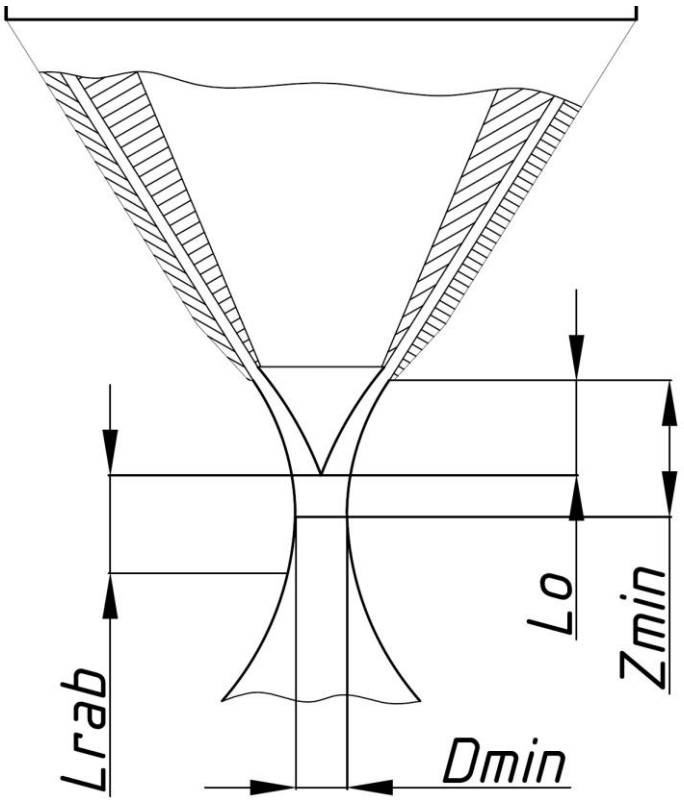
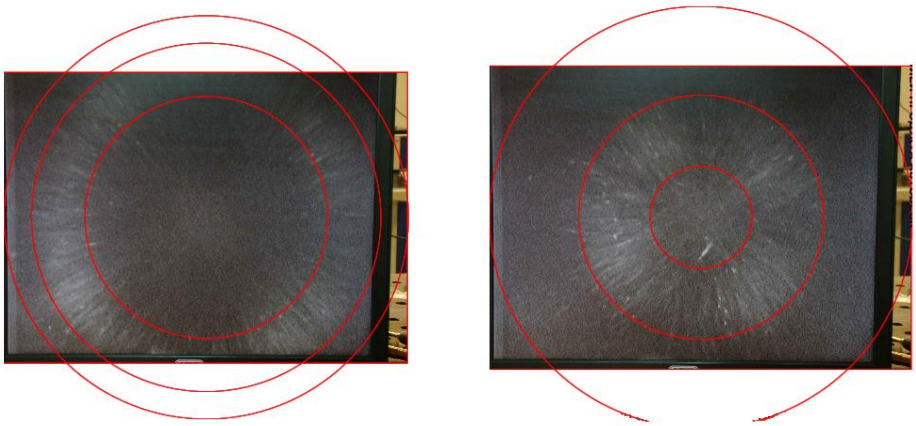


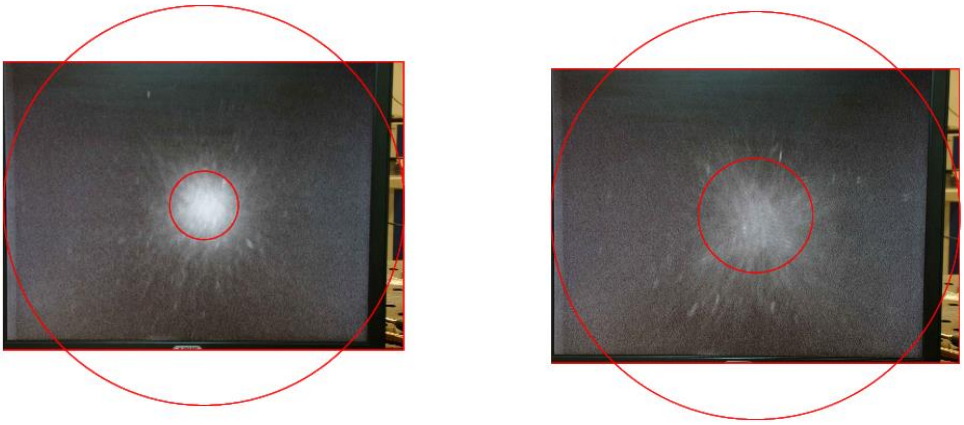
Рисунок 1.11 – Схема газопорошкового потока в зоне обработки

В ходе исследований проведена последовательная продувка серии насадок для коаксиального сопла и четырехструйного сопла. Все коаксиальные сопла представляют из себя комбинации насадок: внутренней и внешней. Внутренняя насадка защищает поток от лазерного луча, внешняя насадка формирует газопорошковый конус на выходе из сопла и значительно влияет на конечные параметры потока. Угол при вершине конуса всех рассмотренных сопел составляет 64 градуса. Поскольку все оснастки расположены в одной плоскости, условия наплавки (диаметр луча и распределение интенсивности) являются одинаковыми. Ниже приведены результаты исследований для различных комбинаций насадок с их размерами.

Измерения проводились по снимкам, полученным с коаксиальной камеры. Рисунок 1.12 показывает, на каком расстоянии от среза сопла находится перетяжка порошка.



а) б)



в) г)

Рисунок1.12 –изображения с коаксиальной камеры расстояние от сопла 3 мм а), 6 мм б), 12мм в), 15 мм)

Из полученных изображений с коаксиальной камеры по формуле:

$$x = px / D, [пиксель / мм]$$

Где px – размер изображения сопла на рисунке в мм,

D – диаметр внутреннего сопла

Зная масштаб, измеряем каждый диаметр в пикселях рисунка ($D_{изм}$) и пересчитываем его в истинный размер газпорошкового потока в каждом конкретном сечении:

$$R = D_{изм} / 2 \cdot x$$

Коаксиальное сопло S 0. 5

Размеры наконечника исследуемого коаксиального сопла представлены на рисунке 1.13.

В результате исследований установлено, что частицы порошка, вылетающие из сопла, образуют ярко выраженный конус с перетяжкой и вторым, внутренним конусом, как и представлено на эскизе. Результатом измерений стало распределение газопорошкового потока в масштабе и с размерами, привязанными к конкретной комбинации сопел. Из графика (рисунок 1.14) видно, что размеры потока на выходе из сопла близки к геометрическим размерам самого сопла. Фокус газопорошкового потока находится на расстоянии около 11 мм от среза сопла, минимальный диаметр потока порошка составляет 2 мм.

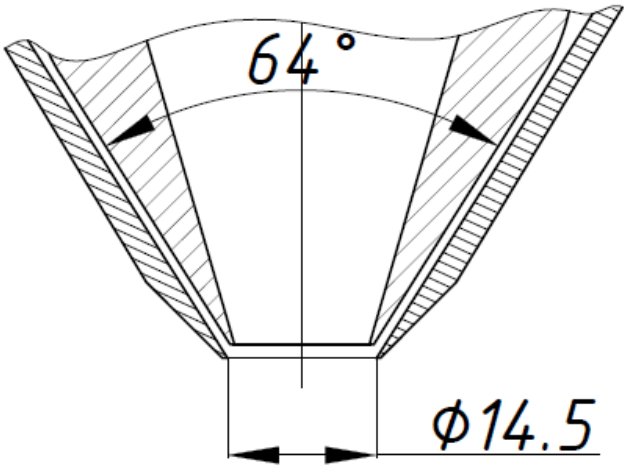
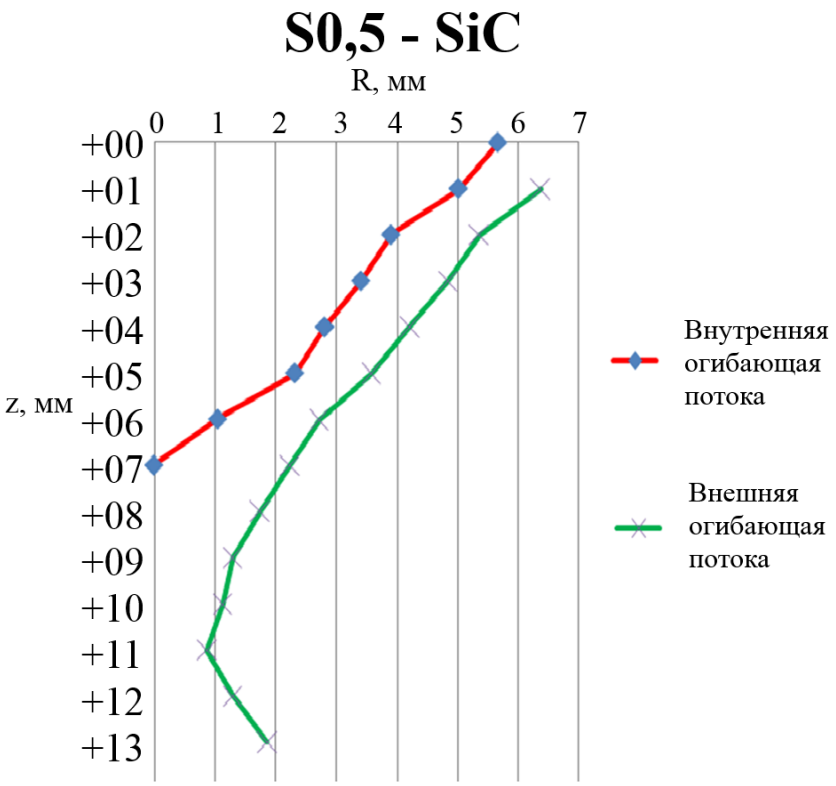
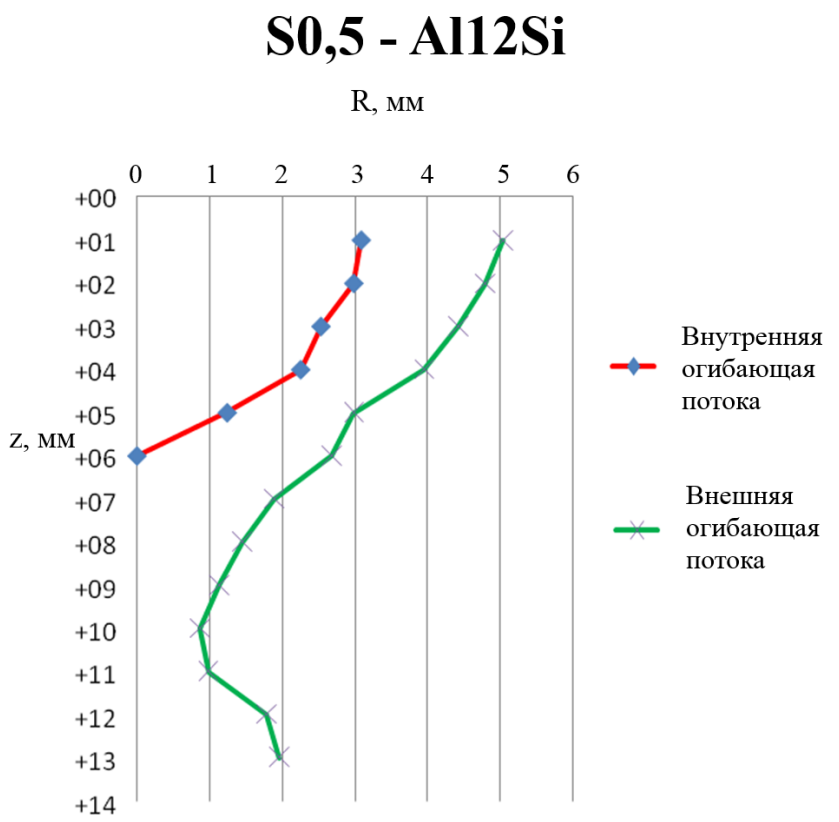


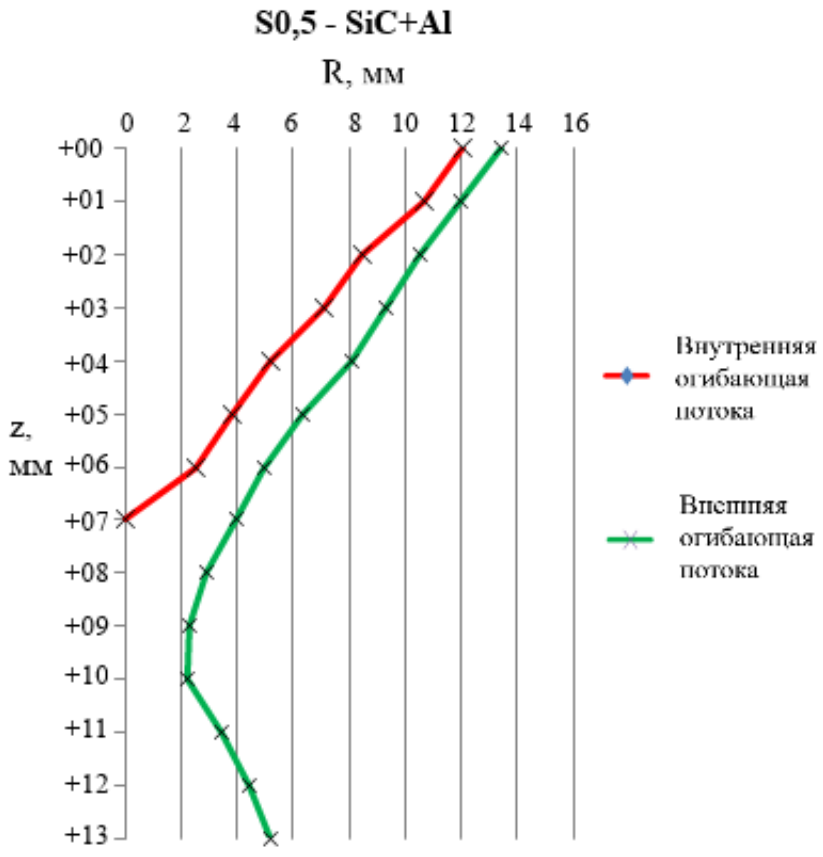
Рисунок 1.13 – эскиз рабочей части сопла S 0.5



а)



б)



в)

Рисунок 1.14 - измерения газопорошкового потока от сопла S 0,5: а) для порошка SiC, б) для порошка Al12Si, в) для порошка Al12Si+SiC

Перетяжка на коаксиальном сопле S0,5 для разных порошков предсталвена в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – параметры потока для сопла S0.5.

	Расстояние от среза сопла до перетяжки. мм	Минимальный диаметр потока, мм
SiC	от 9 до 12	1.8
Al12Si	от 9 до 11	1. 8
SiC+Al	от 9 до 10	4.1

Коаксиальное сопло S 1.0

Размеры наконечника исследуемого коаксиального сопла представлены на рисунке 1.15. Данное сопло отличается от предыдущего выходным диаметром внешней насадки.

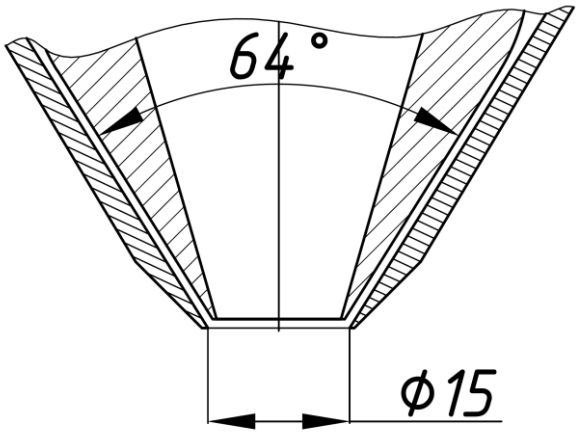
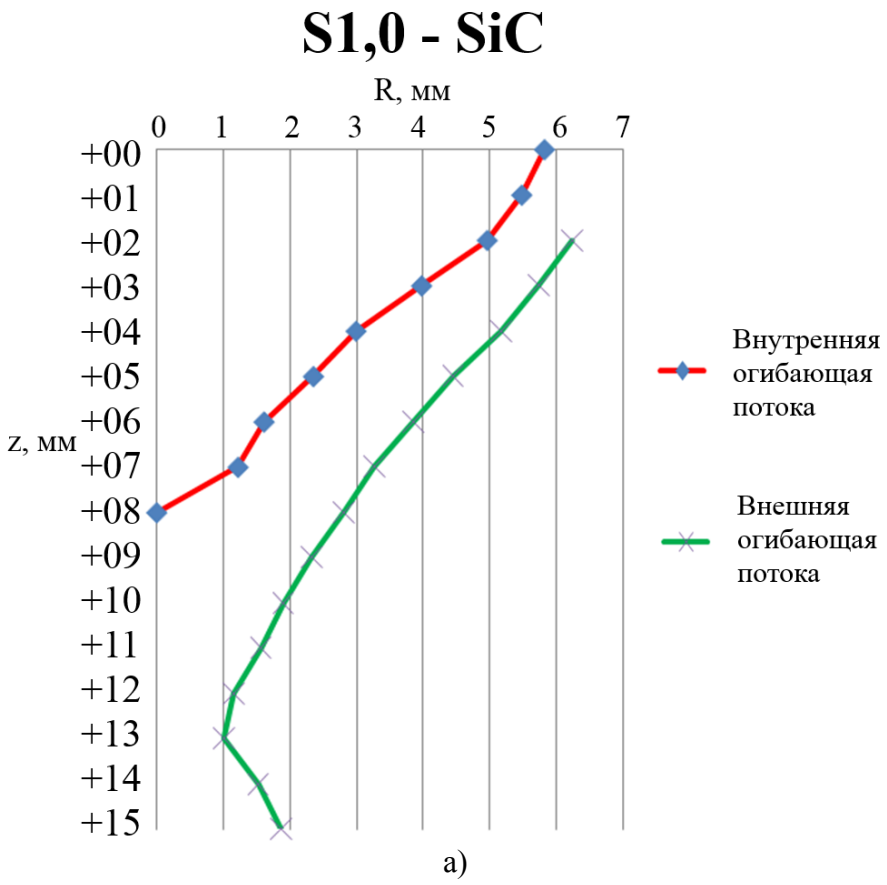
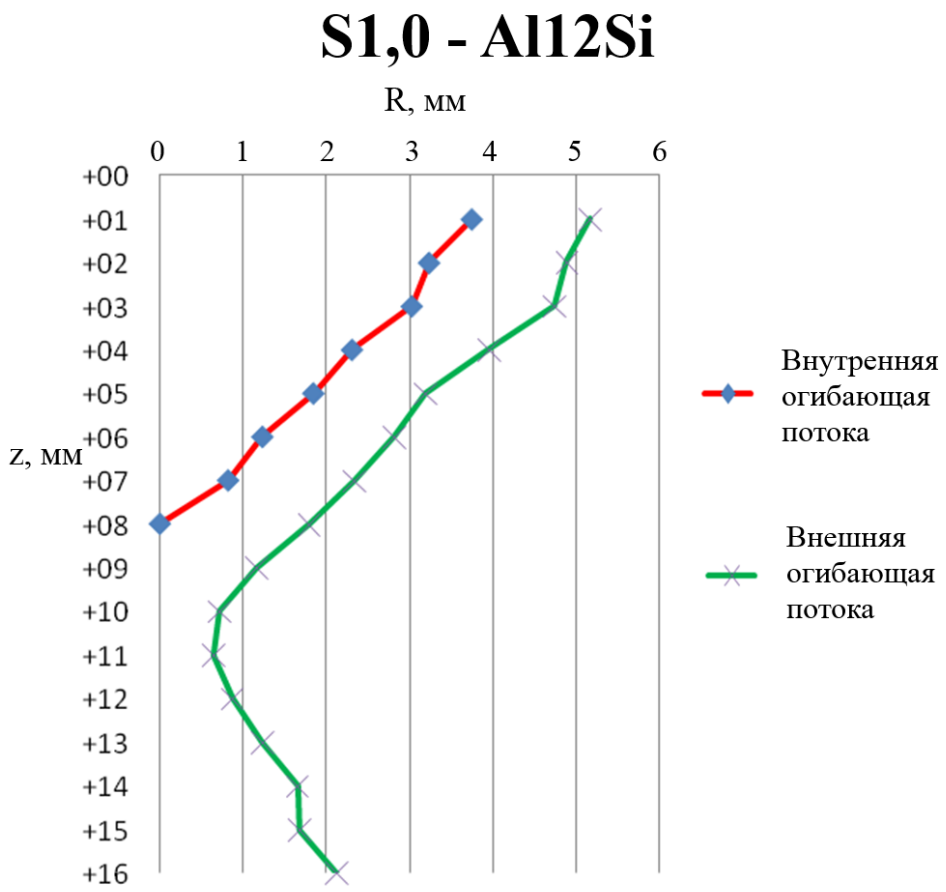


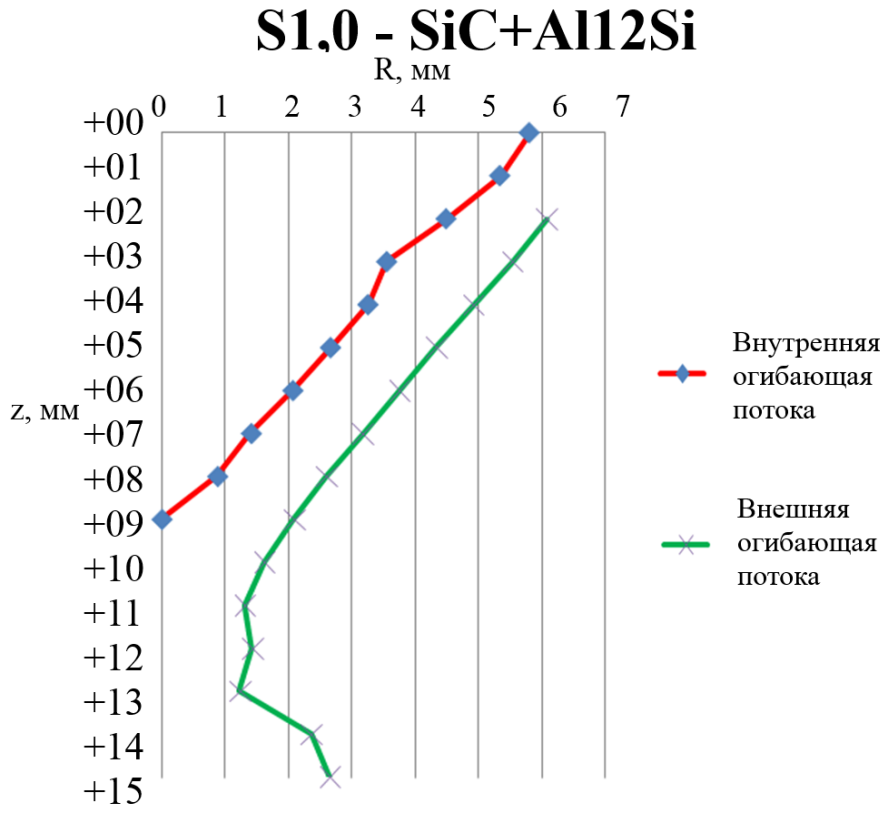
Рисунок 1.15 - эскиз рабочей части сопла S 1.0



а)



б)



в)

Рисунок 1.16 - измерения газопорошкового потока от сопла S 1,0: а) для порошка SiC, б) для порошка Al12Si, в) для порошка Al12Si+SiC

Перетяжка на коаксиальном сопле S1,0,для различных порошков представлена на рисунке 1.16 и в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – параметры потока для сопла S1.0.

	Расстояние от среза сопла до перетяжки. мм	Минимальный диаметр потока, мм
SiC	от 12 до 13	2
Al12Si	от 10 до 12	1. 2
SiC+Al	от 11 до 13	2.4

Четырехструйное сопло

Размеры наконечника исследуемого коаксиального сопла представлены на рисунке 1.17. Порошок в сопле подают четыре отдельных трубочки с диаметром 2 мм. Угол наклона трубочек составляет 64 градуса от нормали к поверхности.

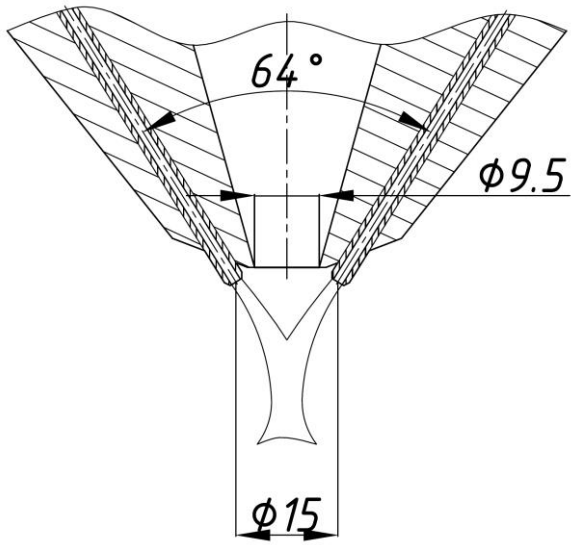
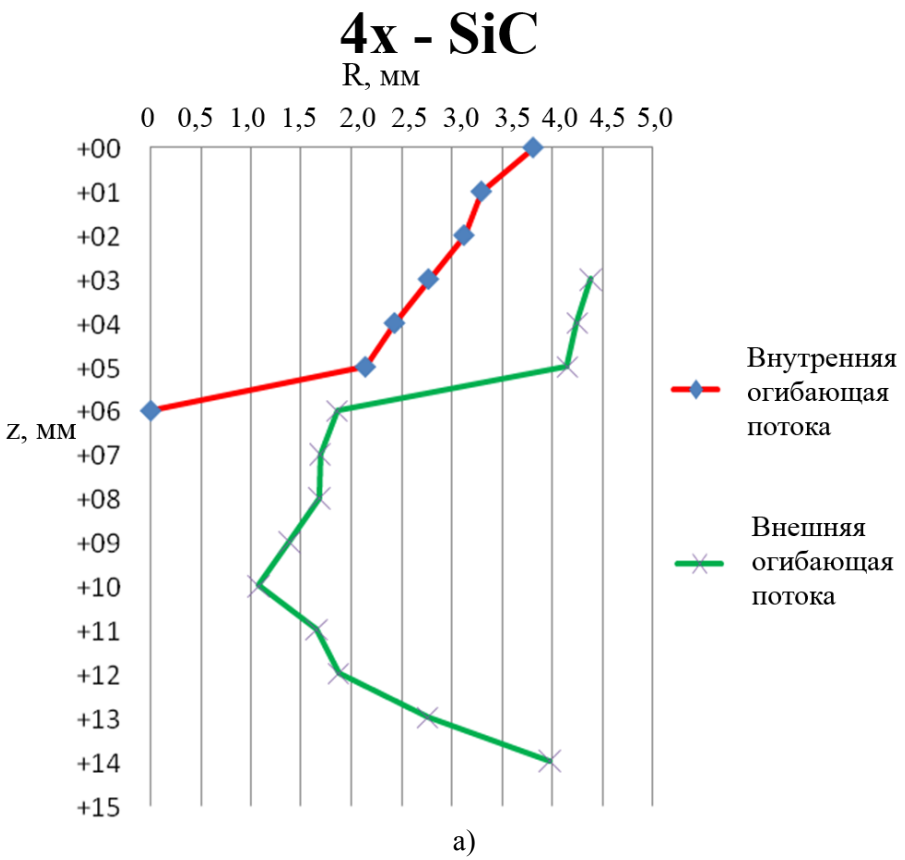
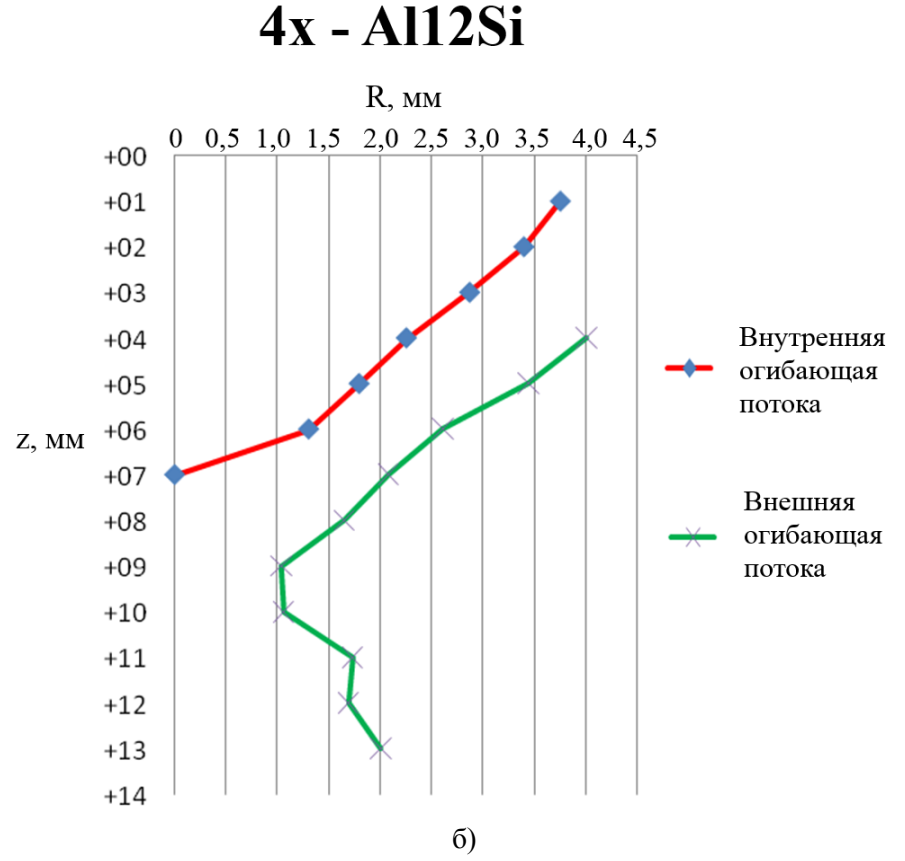


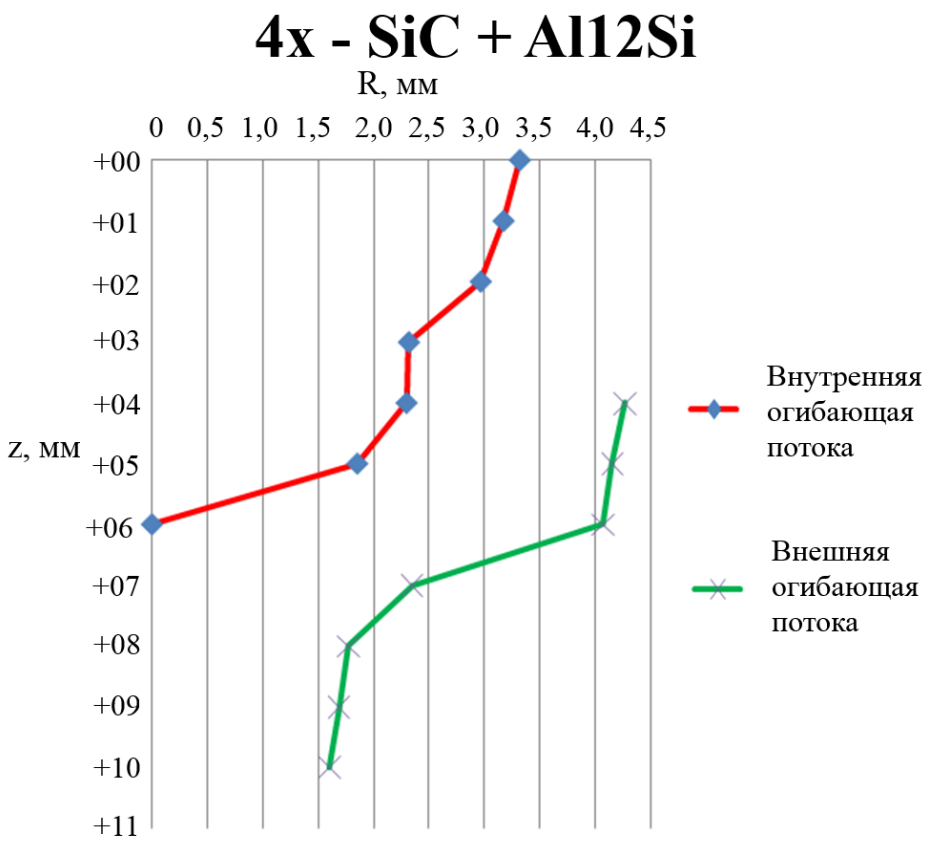
Рисунок 1.17 - эскиз рабочей части четырехструйного сопла


4x - SiC
R, мм
0 0,5 1,0 1,5 2,0 2,5 3,0 3,5 4,0 4,5 5,0
+00
+01
+02
+03
+04
+05
+06
+07
+08
+09
+10
+11
+12
+13
+14
+15
z, мм
Внутренняя огибающая потока
Внешняя огибающая потока

а)


4x - Al12Si
R, мм
0 0,5 1,0 1,5 2,0 2,5 3,0 3,5 4,0 4,5
+00
+01
+02
+03
+04
+05
+06
+07
+08
+09
+10
+11
+12
+13
+14
z, мм
Внутренняя огибающая потока
Внешняя огибающая потока

б)



в)

Рисунок 1.18 - измерения газопорошкового потока: а) для порошка SiC, б) для порошка Al12Si, в) для порошка Al12Si+SiC

Перетяжка на четырехструйном сопле, для различных порошков представлена на рисунке 1.18 и в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – параметры потока для четырехструйного сопла.

	Расстояние от среза сопла до перетяжки. мм	Минимальный диаметр потока, мм
SiC	от 9 до 11	2.2
Al12Si	от 9 до 10	2. 1
SiC+Al	от 8 до 10	3.2

Таким образом, установлено, что наименьшие зазоры между срезом сопла и поверхностью подложки для отдельных порошков и для их смесей не одинаковые. Минимальный диаметр газопорошкового потока для смеси порошков больше, чем диаметр перетяжки для чистых порошков.

Вывод

В ходе исследования были получены зависимости размера перетяжки от формы частиц порошка. Было установлено, что для порошка SiC диаметр перетяжки минимальный на коаксиальном сопле, максимальный - на четырехструйным сопле. Комбинация порошков подается с наименьшим диаметром перетяжки через сопло S1,0, так как на данной насадке конусы газопорошкового потока практически совпадают.

Поскольку ширина газопорошкового потока при подаче четырехструйным соплом гораздо больше, чем при подаче коаксиальными соплами, использование четырехструйных сопел оправдано только при наплавке широким лучом лазера с большой средней мощностью излучения.

Установлено так же, что сферические частицы (Al12Si) при подаче через коаксиальные сопла имеют фокусное расстояние ближе к срезу сопла, чем колотые частицы с той же плотностью (SiC). Поэтому при наплавке композиционных материалов – смесей алюминия и карбида кремния – необходимо учитывать их несимметричное распространение в конусе газопорошкового потока.

Литература

1. 1.*Новиченко Д. Ю.* Разработка и исследование процесса прямого лазерного изготовления детали из композиционного материала на основе стали и карбида титана. Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011 г.
2. 2.*Третьяков Р.С.* Технологические особенности процесса лазерной модификации поверхностей с коаксиальной подачей порошковых материалов. Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014 г.
3. Технологические процессы лазерной обработки : учеб. пособие для вузов / Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. ; ред. Григорьянц А. Г. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 664 с.

УДК 621.375.826

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ ND :YAG ЛАЗЕРА ДЛЯ АБЛЯЦИИ МЕТАЛЛОВ В ЖИДКОСТИ.

Сидоровнина Татьяна Юрьевна [(1)], Тимошенко Валерия Анатольевна [(2)], Савкин Александр Николаевич [(3)]

Студент 4 курса [(1)], студент 4 курса [(2)], аспирант 2 года [(3)],
кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Ю.В. Голубенко,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении».

Развитие науки о наноструктурах и, прежде всего, о квантовых наноструктурах (нанофизики) и нанотехнологий даст возможность получения наноматериалов с качественно новыми свойствами. Развитие наноэлектроники и наномеханики послужит основой качественно нового этапа в разработке новейших информационных технологий, средств связи, в решении проблем качественно нового уровня жизни и пр. Успех в развитии этих направлений определится, по сути, решением двух основных проблем: разработка надежных способов создания наноматериалов и нанообъектов с требуемыми свойствами, включая использование методов поатомной сборки и эффектов самоорганизации; разработка новых и развитие существующих методов нанодиагностики с атомным разрешением. Современный прогресс в области нанотехнологий позволяет надеяться, что уже в недалеком будущем многие проблемы будут решены. [1].

Лазерная абляция является одним из перспективных способов, который предоставляет новые возможности управления характеристиками синтезируемых наночастиц металлов и полупроводников. [2]

Одним из наиболее распространённых способов получения наночастиц с помощью лазерного излучения является импульсная лазерная абляция (ИЛА) твердых мишеней в

жидкости, газе или вакууме. Наночастицы получают в форме порошка, тонких пленок, а также коллоидных растворов.

Данным методом можно получать широкий спектр тонких пленок на подложках, выбирая в качестве мишени различные материалы и используя разные газы. Плотность, толщину и однородность пленок также можно изменять, варьируя различные параметры лазерной абляции, такие как длина волны лазерного излучения, плотность энергии и длительность лазерного импульса, расстояния до объектов и температуру подложки [6].

Среди функциональных наноматериалов и покрытий, полученных данным методом можно выделить металлические проводники, полупроводниковые структуры, диэлектрические слои на основе оксидной или другой керамики, а также высокотемпературные сверхпроводники и алмазные пленки. Разнообразие материалов и покрытий, получаемых методом лазерной абляции, обуславливает большое применение их в различных приложениях, таких как, полупроводниковые приборы, электроды, износостойкие и теплоизоляционные покрытия, катализаторы, сенсорные устройства и др. [6]

Выше перечисленные примеры показывают, что лазерная абляция является перспективным методом получения функциональных наноматериалов. По сравнению с другими физическими (парофазное осаждение, ионно-плазменное или дуговое напыление и др.) и химическими методами (химическое осаждение, в том числе гидротермальные методы, с применением поверхностно-активных веществ и слабого осаждения), метод лазерной абляции имеет несколько преимуществ. Среди них:

• простой и химически чистый синтез конечных продуктов, без включения побочных примесей, что позволяет не проводить дополнительную очистку;

• низкая себестоимость экспериментальных установок и простота контроля процесса абляции;

• возможность формирования метастабильных фаз, за счет быстрого нагрева и охлаждения аблированного вещества (до 1000 К/с) в условиях высокого давления плазменного факела в области воздействия лазерного излучения;

• высокая скорость осаждения аблированного вещества (> 1050 $\frac{\text{атом}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$) и непосредственная связь энергетических параметров излучения с кинетикой роста слоя;

• возможность конгруэнтного испарения многокомпонентных мишеней; строгая дозировка подачи материала, в том числе многокомпонентного с высокой температурой испарения;

• агрегация в кластеры или наночастицы различного размера, аблирующих с кинетической энергией 10 - 500 эВ.

• Электрическая поляризация аблированных частиц, позволяющая селектировать и упорядочивать их с помощью электрического поля для получения определённой структуры осаждаемой плёнки [6].

Таким образом, преимуществом метода лазерной абляции в воде является то, что материальный состав мишени полностью отражается в составе получаемых наночастиц, что позволяет получить чистый коллоидный раствор без примесей, который может использоваться в дальнейшем. Лазерная абляция в воде не требует большого количества времени на протекание химических реакций, высоких температур нагрева или давления.

Свойства получаемых наночастиц (форма, размер, состав и структура) зависят от параметров лазерного излучения (длина волны, частота следования импульсов, энергия в импульсе), используемого для абляции.

Выделяют три режима взаимодействия лазерного излучения с мишенью, определяющие соотношения временных параметров процесса абляции (длительность импульса, время электронной релаксации, время нагрева решетки мишени): фемто-, пико- и наносекундный режимы. Таким образом, для осуществления фемто-, пико- и наносекундного режима используются фемтосекундные, пикосекундные и наносекундные импульсы лазерного излучения соответственно.

Обычным методом получения пико- и фемтосекундных лазерных импульсов является синхронизация мод. Для получения фемтосекундных импульсов используется пассивная синхронизация мод. В этом случае используется некоторый нелинейный элемент, при прохождении которого импульс становится уже. В роли нелинейных элементов могут выступать так называемые насыщаемые поглотители, нелинейные зеркала типа волоконной петли и др. Идея использования насыщаемого поглотителя состоит в том, что при распространении импульса через такой прибор его края поглощаются существенно сильнее, чем центр (амплитуда которого намного больше). Это эквивалентно уменьшению длительности импульса. Существуют образцы лазеров, использующих насыщаемые поглотители для генерации импульсов длительностью 320 фс. В случае абляции фемтосекундными импульсами выброс материала мишени и формирование плазменного облака происходят значительно позже окончания импульса [5].

В пикосекундном режиме возможно наблюдение логарифмической зависимости глубины абляции от плотности энергии лазерного импульса. ИЛА в этом случае сопровождается электронной теплопроводностью и образованием расплавленной зоны внутри мишени. Несмотря на то, что внутри мишени процесс испарения можно рассматривать как непосредственный переход твердое тело-пар (или твердое тело – плазма), присутствие жидкой фазы внутри мишени ухудшает точность лазерной обработки металлических материалов в пикосекундном режиме по сравнению с фемтосекундным [5].

В наносекундном режиме поглощённая лазерная энергия сначала нагревает поверхность мишени до температуры плавления, а затем до температуры парообразования. При этом выброс материала из мишени происходит преимущественно за счет тепловых процессов, поскольку имеется достаточно времени, чтобы тепловая волна распространилась в глубь мишени и образовался толстый слой расплавленного материала. В этом случае испарение происходит от жидкого металла [5].

В таблице 1 сведены типичные параметры лазеров, используемых для абляции. [2]

Таблица 1.

Лазер	Длина волны, мкм	Длительность импульса, нс	Энергия в импульсе, мДж	Частота повторения импульсов, Гц	Материал мишени
CO_2	10,6; 9,6	80	200	-	Графит, биоткань
Эксимерный	0,308	15	30	5	Графит, биоткань
Гольмиевый	2,91	130	$(2,7…4,0)\cdot10^3$	1	Сапфир, ультрадисперсный алмаз, биоткань
Эрбиевый	2,94	150	500	-	Сапфир, ультрадисперсный алмаз, биоткань
На алюмо-иттреевом гранате	0,532 0,270 1,064	0,3 9	2…5	10	Алмаз, металлы, керамика, биоткань
На свободных электронах	2…10	5000	22	30	Полимеры, биоткань
На кристалле Ti:Sa	0,775	0,170 5	300	10	Cu, Zn, Ag, Au

На парах меди	0,510 0,578	20	0,06…50	(2…50) $\cdot 10^3$	Биоткань, металлы, стекло

Газоразрядные CO_2 – лазеры являются наиболее ярким представителем семейства так называемых молекулярных лазеров, инверсная заселенность в которых создается между колебательными уровнями молекул. CO_2 – лазеры имеют наибольший КПД преобразования электрической энергии в энергию излучения. Это их свойство совместно с простотой в эксплуатации при высоких мощностях как в импульсном, так и в непрерывном режимах обусловило широкое применение CO_2 – лазеров для обработки материалов [8]. CO_2 – лазеры широко применяются в медицине. Спектр поглощения для биоткани определяется типом доминирующих поглощающих центров и содержанием воды. Так, в диапазоне 400 - 900 нм спектр поглощения кожи в основном обусловлен присутствием в ней меланина и клеток крови, а для излучения с длиной волны более 1200 нм практически полностью совпадает со спектром поглощения воды [7]. В работе [9] методом эмиссионной спектроскопии с временным разрешением исследовано свечение факела углеродной плазмы, возникающей при абляции графита в вакууме излучением импульсного CO_2 – лазера. Параметры используемого лазера: λ (длина волны) = 9,6 мкм; W (энергия в импульсе) = 200 мДж. Абляция осуществлялась в вакууме, что обусловлено достаточно низким коэффициентом поглощения лазерного излучения водой на длине волны 9,6 мкм.

В работе [10] для лазерной абляции применяют KrF – лазер (эксимерный) с длиной волны излучения 248 нм, длительностью импульса 5 пс и частотой следования импульсов 10 Гц. Впервые экспериментально исследован процесс образования наноструктур на поверхностях титана, никеля, молибдена и вольфрама при их абляции в жидкости пико- и фемтосекундными лазерными импульсами. Средний поперечный размер структур составляет 50 – 200 нм в зависимости от материала подложки. Морфология и плотность структур зависят от числа и длительности лазерных импульсов, а также от плотности энергии излучения на мишени. Установлено, что в случае облучения титана в жидкостях цвет модифицированной области обусловлен плазменными колебаниями электронов в наноструктурах. Высокая плотность структур позволяет использовать такие подложки в качестве среды для магнитной записи информации и в качестве полевых эмиттеров электронов [10]. В исследовании [13] при облучении золотой мишени в дистиллированной воде излучением эксимерного лазера с длинной волны 248 нм, частотой следования импульса 1 Гц, энергией в импульсе 1.5 Дж/см2, и размерами пятна на поверхности мишени 5х3 мм, наблюдается следующая картина. Формирование глубоких каналов не происходит. Структуры представляют собой возвышения над поверхностью образца. Подобные структуры покрывают большую часть площади области облучения. В данном эксперименте не осуществлялось перемещение образца под лазерным излучением. Часть структур заканчиваются сферообразными вершинами, что указывает на то, что именно с вершин структур, возможно, происходит постепенный вынос расплавленного вещества в окружающую жидкость.

Одной из актуальных в последние годы проблем является очистка ультрадисперсных алмазов. В исследовании [11] изучалось воздействие импульсного излучения гольмиевого лазера на водную суспензию ультрадисперсного алмаза. В работе [12] экспериментально исследована абляция сапфира при облучении его границы раздела с водой и водными растворами КОН, KCl и Na_2CO_3 импульсами излучения гольмиевого лазера[2].

Эрбиевый лазер относится к семейству волоконных лазеров. Благодаря широкому выбору параметров волоконные лазеры нашли применение во многих сферах деятельности. В основном, они используются для гравировки и резки металлов в промышленности и для лазерной маркировки товаров, где необходимы большая пиковая мощность коротких импульсов, следующих с заданной частотой. Так, для пластика и

металла используются импульсы 5—10 кВт длительностью от 10 до 100 нс при частоте следования от 20 до 200 кГц. Это позволяет изменять лишь оптические свойства поверхности без повреждения внутренней структуры изделия. Лазеры до 60 Вт используются при сварке нержавеющей стали в компонентах электроники и медицинских инструментов толщиной в десятые доли миллиметра. Для получения мощных наносекундных импульсов с частотой следования в единицы и десятки килогерц часто применяется модуляция добротности. Использующие её волоконные лазеры способны генерировать излучение с энергией порядка 1 мДж в импульсе с пиковой мощностью более 100 кВт. Обычным методом получения пико- и фемтосекундных лазерных импульсов является синхронизация мод.

В [14] приведены результаты экспериментов по формированию наноструктурированных покрытий на различные подложки из коллоидных систем при лазерном импульсно-периодическом воздействии. Экспериментально показано, что формирование наноструктурированных покрытий происходит в два этапа в соответствии с траекторией перемещения лазерного пучка по поверхности подложки. Для реализации процесса абляции в [14] использовалось излучение YAG :Nd – лазера с длиной волны 1,06 мкм с модуляцией добротности. Длительность импульса составляла 100 нс, средняя мощность излучения 2,5 Вт, частота следования импульсов 20 кГц, диаметр лазерного пучка на поверхности подложки, на которой происходило формирование наноструктур, составлял 50 мкм. В качестве мишени для абляции использовались медные, кремниевые и стеклянные подложки. Процесс абляции в этом случае протекал в жидкой среде – глицерине. В ходе экспериментов на поверхности мишени формировался компактный слой, плотно сгруппированный вдоль траектории движения лазерного пучка.

В работе [10] использовалось четыре источника лазерного излучения, среди которых:

1. Nd:YAG-лазер с длиной волны излучения 1,06 мкм, длительностью импульса 350 пс и частотой повторения импульсов 300 Гц.
2. Третья гармоника излучения Nd:YAG-лазера с длиной волны 355 нм, длительность импульса 150 пс и частотой повторения 10 Гц.

В качестве мишеней для абляции использовались полированные пластинки молибдена, вольфрама и титана толщиной 100 мкм. Мишень помещалась на дно стеклянной кюветы, которая заполнялась жидкостью. В первом случае кювета располагалась на управляемом компьютерном столе для ее перемещения с заданной скоростью перпендикулярно оси лазерного пучка. Во втором случае облучение проводилось в стационарном режиме. Излучение лазера фокусировалось на мишень сквозь слой жидкости толщиной несколько миллиметров. Площадь сечения пучка в плоскости мишени определялась по размерам модифицированной области. Излучения всех лазерных источников были линейно поляризованными.

В [13] представлены экспериментальные результаты по образованию наночастиц меди и ее сплава латуни при лазерной абляции в различных жидкостях. Для этих целей используются два типа лазерных источников: лазер на парах меди и Nd:YAG-лазер. Взаимодействие наночастиц с лазерным излучением может оказывать влияние на свойства наночастиц, поскольку вероятность повторного попадания наночастицы в лазерный пучок велика в случае многоимпульсного режима получения. В одной из глав работы [13] приводятся экспериментальные результаты о селективном удалении цинка из наночастиц латуни при лазерном облучении их суспензии в этаноле. Исследование спектров поглощения наночастиц показывает, что по мере облучения наночастицы латуни трансформируются в наночастицы меди.

Для лазерной абляции мишени из бронзы в [15] использовался импульсный твердотельный лазер Nd:YAG (λ = 1064 нм, 8 нс, E = 200 мДж, 1 Гц). Лазерное излучение фокусировали при помощи линзы (f = 150 мм) по нормали к поверхности образца. Расстояние между линзой и поверхностью образца составляло 149 мм, а перетяжка

располагалась на глубине 1 мм за поверхностью образца. Диаметр пятна фокусировки определялся по размеру кратера на поверхности образца от одного импульса, что обеспечивало среднюю плотность энергии 300 Дж/см2. Система управления лазером обеспечивала возможность генерации двух импульсов с задержкой 45 мкс за одну вспышку лампы. Изображение лазерной плазмы в масштабе 1:1 проектировалось с помощью кварцевой линзы (f = 85 мм) на входную щель спектрографа. Спектрограф (Jobin Yvon TRIAX 5500) был оборудован детектором на основе ПЗС-матрицы с усилителем яркости (Andor iStar). Спектральное разрешение всей системы составляло 0,1 нм, временное 10 нс. Для проверки выполнения предположения о локальном термодинамическом равновесии проводилось наблюдение небольшой локальной области плазмы. Для этого регистрировался спектр небольшого центрального участка плазмы (0.1×1 мм). Время регистрации составляло 2 мкс, задержка относительного лазерного импульса 1,5 мкс.

В работе [2] приводится ряд исследований, в которых в качестве источника излучения использовался лазер на свободных электронах, генерирующий микроимпульсы длительностью 4 мкс, которые в свою очередь состояли из серии микроимпульсов длительностью 1…2 пс. Частота повторения импульсов данного лазера составляла 30 Гц, энергия в импульсе 22,5 мДж, плотность энергии на поверхности образца – 72 Дж/см^2 (диаметр пятна в фокусе 200 мкм). Недостатком такого лазера является сложность его конструкции, высокая стоимость и большие габариты, что не позволяет использовать его повсеместно для технологических применений и в медицинских целях.

Для лазерной абляции металлов в жидкости и последующей генерации наноструктур в работе [10] использовалось излучение титан-сапфирового лазера с длиной волны излучения 800 нм, длительностью импульса 180 фс и частотой повторения 1 кГц.

В [14] приводятся результаты экспериментов по получению наночастиц различных металлов при воздействии лазерного излучения на массивные образцы материалов, помещенных в жидкость. Рассмотрены два сценария лазерной абляции металла в жидкости с образованием коллоидных систем с наночастицами. Мишенями являлись образцы никеля, меди, титана. Одним из источников лазерного излучения, используемых в данных экспериментах является титан - сапфировый фемтосекундный лазер с длиной волны 0,8 мкм. Средняя мощность составила 0,87 Вт, длительность импульса 50 фс, частота повторения импульсов 100 Гц/1 кГц. В качестве жидкой среды для абляции использовались этанол и глицерин.

Для изучения спектров наночастиц золота и серебра, полученных абляцией металлических мишеней в этаноле в работе [4] в качестве источника излучения используется титан-сапфировый лазер с длительностью импульса 120 фс. Плотность энергии лазерного пучка на мишени около 5 Дж/см^2. Для наночастиц серебра вторая гармоника излучения титан-сапфирового лазера попадает практически в максимум плазмонного резонанса, тогда как для частиц золота она заметно отстроена.

В вышеупомянутой статье [2] показано, что при облучении лазерным излучением, генерируемым лазером на парах меди аблированные области приобретают способность восстанавливать металлы (Cu или Ni) из соответствующих растворов автокаталитического осаждения. Длина волны 510 нм, длительность импульса 10 нс, частота следования 8 кГц. Проведены эксперименты по травлению поверхности сапфира лазерным излучением. После процесса травления поверхность сапфира приобретала способность восстанавливать Cu из раствора для химического меднения, образуя медное покрытие, имеющее хорошую адгезию к поверхности сапфира.

На данный момент в области лазерной абляции металлов в жидкостях существует огромное количество работ и статей, проведены разнообразные эксперименты по получению и осаждению металлических наночастиц, формированию протяженных массивов наноструктур, выявлены новые технологии получения функциональных наноматериалов. Проведя анализ широкого диапазона источников, можно сделать вывод,

что для абляции металлических мишеней в жидкостях можно использовать все источники лазерного излучения, представленные в таблице 1. Однако для качественного результата процесса абляции и получения «чистого» коллоидного раствора следует использовать излучение Nd:YAG-лазера. В качестве жидкой среды для абляции следует использовать дистиллированную воду.

В данной работе для осуществления процесса абляции была собрана установка, состоящая из YAG:Nd лазера, фокусирующей системы (фокусирующая линза (f = 95 мм), отклоняющее зеркало), программируемого двух координатного столика с системой управления, кюветы с металлическим образцом и жидкостью, системы крепежей (рисунок 1). Таким образом, была успешно осуществлена ранее разработанная схема процесса абляции (схема 1).

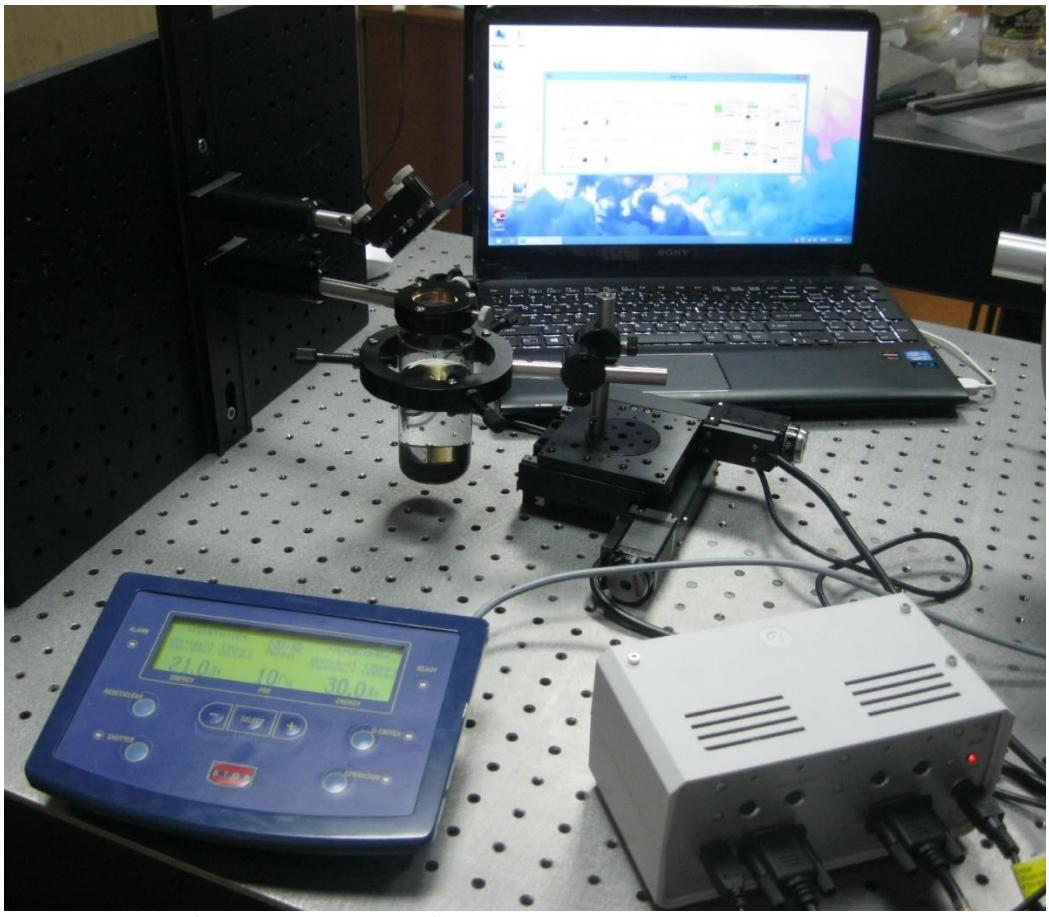


Рисунок 1. Установка для абляции металлической мишени в жидкости.

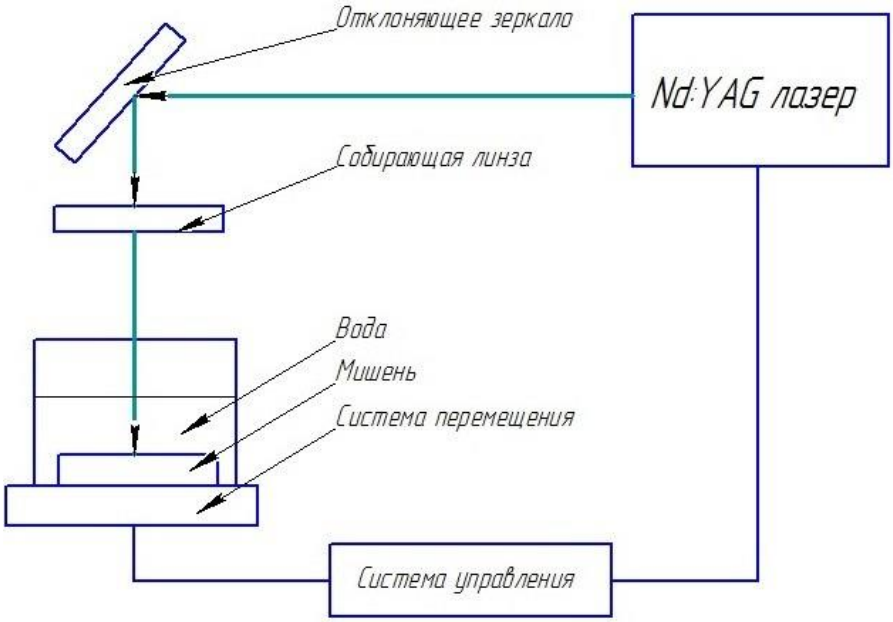


Схема 1. Схема процесса лазерной абляции металлической мишени в жидкости.

Некоторые параметры излучения Nd: YAG- лазера (рисунок 2):
Длины волн, нм ……..1064, 532
Диаметр пучка, мм……при 1064 нм 8 ± 0,5
……при 532 нм 9 ± 0,5
Длительность импульса, нс…….. для 1064 нм, нс 7- 9
Частота следования импульсов, Гц…… 1 -10
Угол расходимости, мрад…….……... на 1064 нм 1,5 ± 0,2
Поляризация:
При 1064 нм – вертикальная;
При 532 нм - горизонтальная.
Энергия импульса, мДж
При 1064 нм ...……1000
При 532 нм ……550

Энергия импульса, получаемая при работе лазера несколько отличается от приведенных выше параметров излучения Nd: YAG- лазера и составляет 500 мДж для длины волны 532 нм.



Рисунок 2. Nd:YAG-лазер, используемый для эксперимента по абляции.

Для генерации излучения с длиной волны λ=532 нм используется генератор второй гармоники. Эффект генерации второй гармоники основан на явлении квадратичной нелинейной поляризуемости среды, в которой при прохождении света высокой интенсивности с частотой ω возникает волна с частотой 2ω. В генераторе второй гармоники используется нелинейный кристалл KTP с угловым синхронизмом. Излучение второй гармоники (532 нм) сепарируется от непреобразованного излучения основной гармоники (1064 нм) при помощи дихроичных зеркал.

В качестве образца использована латунная пластинка 20 х 30 х 1 мм. Образец помещался в объем жидкости равный 100 мл. На данный образец было произведено воздействие различным количеством импульсов лазерного излучения (от 1 до 3500). Результатом процесса абляции является коллоидный раствор латуни, представляющий из себя смесь частиц латуни с широким диапазоном размеров и формы.

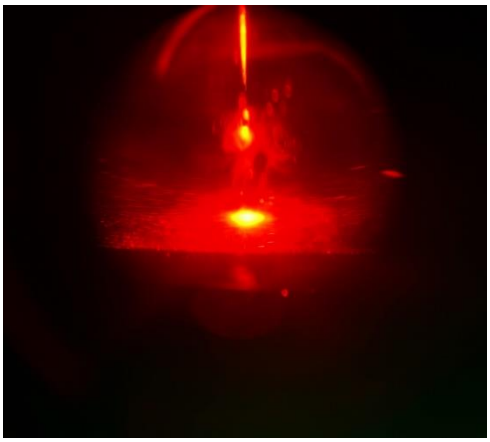


Рисунок 3. Воздействие импульсного лазерного излучения на латунный образец.

Литература

1. .Ж.И.Алферов, акад. РАН, П.С.Копьев, д-р физ.-мат. наук, проф., Р.А.Сурис, чл. корр. РАН, Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург); А.Л.Асеев, чл.-корр. РАН, Институт физики полупроводников СО РАН (г. Новосибирск); С.В.Гапонов, чл.-корр. РАН, Институт физики микроструктур РАН (г. Нижний Новгород); В.И.Панов, д-р физ.-мат. наук, проф., МГУ им. М.В.Ломоносова (г. Москва), Э.А.Полторацкий, д-р физ.-мат. наук, проф., ГНИИ физических проблем им. Ф.В.Лукина (г. Москва), Н.Н.Сибельдин, д-р физ.-мат. наук, Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН (г. Москва). «Наноматериалы и нанотехнологии».
2. А.Н. Солдатов, А.В. Васильева. Томский «Эффект лазерной резонансной абляции в микро- и нанотехнологиях». государственный университет. 2007.
3. А.А. Антипов, С.М. Аракелян, С.В. Кутровская, А.О. Кучерик, Д.С. Ногтев, Е.П. Павлова, В.Г. Прокошев. «Формирование протяжённых массивов наноструктур при лазерном воздействии на коллоидные системы». Владимирский государственный университет, г. Владимир.
4. А.В. Симакин, В.В. Воронов, Г.А. Шафеев. «Образование наночастиц при лазерной абляции твердых тел в жидкостях». РАН, Труды института общей физики им. А.М. Прохорова Т 60- 2004.
5. Г.Н. Макаров. «Применение лазеров в нанотехнологии: получение наночастиц и наноструктур методами лазерной абляции и лазерной нанолитографии». //Успехи физических наук, Т 183- №7- 2013.
6. С.А. Пячин, М.А. Пугачевский. «Новые технологии получения функциональных наноматериалов». г. Хабаровск, 2013.
7. А.В. Беликов, А.Е. Пушкарёва, А.В. Скрипник. «Теоретические и экспериментальные основы лазерной абляции биоматериалов». Учебное пособие. Министерство образования и науки РФ. Санкт-Петербургский Государственный Университет Информационных технологий, механики и оптики. 2011.
8. А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров. «Технологические процессы лазерной обработки». Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2008.
9. А.В. Демьяненко, В.С. Летохов, А.А. Пурецкий, Е.А. Рябов. «Эмиссионная спектроскопия углеродной плазмы при лазерной абляции. Абляция графита CO_2 – лазером, а также (совместно) XeCl- и CO_2 – лазерами». //Квантовая электроника, Т 25- №1-1998.
10. Е.В. Бармина, Э.С. Стратакис, К.Фотакис, Г.А. Шафеев. «Генерация наноструктур при лазерной абляции металлов в жидкостях: новые результаты». //Квантовая электроника. Т 40- №11- 2010.
11. Долгаев С.И., Кириченко Н.А., Кулевский Л.А. и др. «Лазерная очистка ультрадисперсного алмаза в водном растворе». // Квантовая электроника. Т 34 - №9 - 2004.
12. Долгаев С.И., Лялин А.А., Симакин А.В., Шафеев Г.А. «Растворение сапфира в сверхкритической жидкости как механизм лазерной абляции». //Квантовая электроника. Т 31 - №7 - 2001.
13. П.В. Казакевич. «Образование наночастиц при лазерной абляции металлов в жидкостях». 2008.
14. А.А. Антипов. «Лазерные методы получения и осаждения коллоидных систем на поверхность твердых тел». 2013.
15. С.М. Першин, В.Н. Леднев, А.Ф. Бункин. «Лазерная абляция сплавов: физика селективного испарения компонентов». 2011.

УДК 621.375.826

ЛАЗЕРНАЯ АБЛЯЦИЯ МЕТАЛЛОВ В ЖИДКОСТЯХ

Татьяна Юрьевна Сидоровнина [(1)], Валерия Анатольевна Тимошенко [(2)], Александр Николаевич Савкин [(3)],
студент 4 курса [(1)], студент 4 курса [(2)], аспирант 2 года [(3)],
кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»,
Московский государственный технический университет им.Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Ю.В. Голубенко,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении»

В настоящее время известно большое количество методов создания наноструктурированных материалов. Все методы получения наноструктур условно можно разделить на два типа - химические и физические.

К химическим методам получения наночастиц относятся: химическая конденсация паров, получение золей путем жидкофазного восстановления, матричный синтез и т.д.

В данных методах при синтезе наноструктур, кроме наночастиц, образующихся в результате реакций восстановления или ионного обмена, жидкость содержит продукты реакции, которые не подлежат удалению. Физический метод получения наночастиц, например, лазерная абляция твердых тел в жидкости, позволяет избежать данной проблемы и получить коллоидные растворы высокой чистоты. Лазерная абляция - один из наиболее перспективных методов получения таких структур. Он основан на удалении вещества с поверхности в жидкой среде при помощи лазерного излучения с высокой энергетикой. При импульсном взаимодействии вещество испаряется или сублимируется в виде свободных молекул, атомов и ионов. Расплавленный слой мишени граничит с парами окружающей среды.

Процесс взаимодействия лазерного излучения с веществом является неравновесным из-за высоких градиентов температур. Так же на неравновесность процесса влияет малая величина времени нагрева поверхности по сравнению со временем релаксации системы. Использование коротких лазерных импульсов приводит к увеличению плотности испаряемой жидкости над поверхностью образца. Давление паров, окружающих мишень, определяют динами расплава (1 дин = 1 г·см/с^2 = 10^{-5} Н). Взаимодействие данных паров и ванны расплава приводит к образованию ряда неоднородностей (Релея – Тейлора и Кельвина-Гельмгольца) [1], которые со временем развиваются в периодические структуры.

На сегодняшний день выполнено большое количество работ, посвященных образованию наноструктур. Получены самоорганизующиеся наноструктуры на поверхности серебра [2]. Исследовано формирование наночастиц Al и Cu в результате лазерной абляции излучением неодимового лазера в газовой среде [3]. В работе [4] реализованы периодические структуры на таких металлах как, медь, латунь, бронза и вольфрам. Автор данной работы определил положение плазмонного резонанса наночастиц латуни (515нм) и доказал экспериментально, что форму и размер металлических коллоидов можно изменять путем перестройки длины волны лазерного излучения в пределах их плазмонного резонанса.

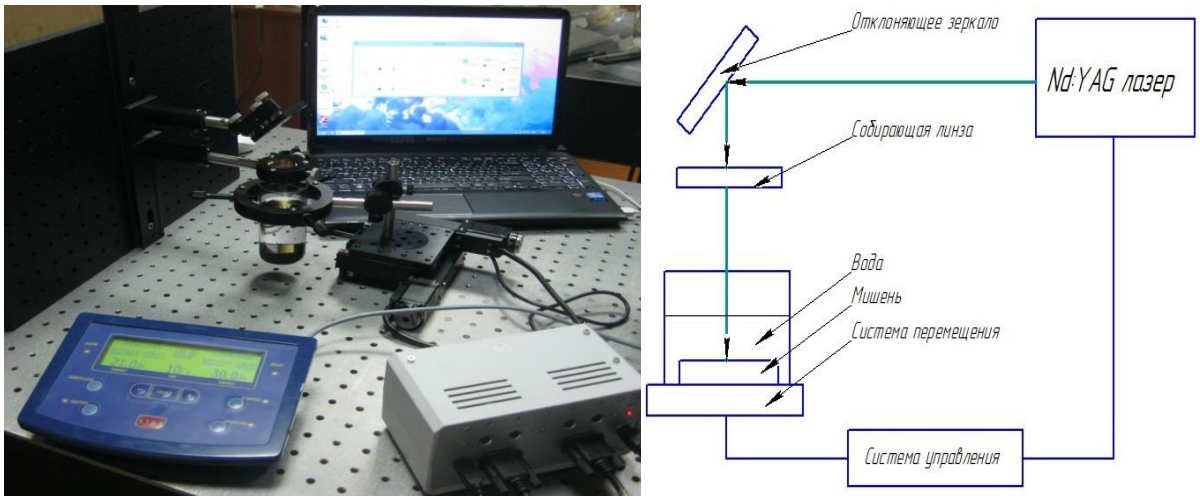
Одна из тенденций развития нанотехнологий- осаждение коллоидных систем на поверхности твердых тел [5]. Нанокоструирование материалов, заключающееся в распределении коллоидов на поверхности или в матрице подложки определенным образом, находит широкое применение в областях наноэлектроники и фотоники для получения термоэлектрических элементов, детекторов, источников излучения, элементов

памяти, солнечных батарей и т.д. Из сплавов на основе меди наибольшее применение в электротехнике и электронике получили бронзы и латуни.

Получение таких ценных растворов коллоидов, как коллоиды латуней – острая задача для ряда отраслей. Однако получение наночастиц латуни химическими методами невозможно. Это связано с сильной разницей химических свойств компонентов латуни. Согласно литературным данным, исследуемый метод позволяет получить коллоидные растворы латуней с приемлемой для производства чистотой и производительностью.

Целью работы являлось получение коллоидных систем двухкомпонентной латуни, выявление и изучение особенностей протекания процесса лазерной абляции. В качестве мишени использовались пластины размером 20x50x4 мм. Поверхность образцов предварительно полировалась до шероховатости Rz=3 мкм. Данная операция проводилась для обеспечения равномерного взаимодействия лазерного излучения с поверхностью мишени. Экспериментальный стенд состоял из: фокусирующей системы, включающей в себя набор линз, перестраиваемого Nd:YAG (Nd-doped yttrium-aluminum garnet laser) лазера (LQ829 фирмы Solar); двухкоординатной системы перемещения; кварцевой кюветы с жидкостью; системы креплений.

Для абляции использовалась вторая гармоника Nd:YAG лазера с длиной волны 532 нм. Частота следования импульсов составляла 10 Гц. Длительность импульса - 10 нс. Энергия импульса – 0,05 Дж. Фокусное расстояние системы было равно 100 мм. Экспериментальный стенд представлен на Рис.1 а).



а) б)

Рис.1. а) экспериментальный стенд;
б) схема установки;

Расфокусированное излучение направлялось на зеркально отполированную поверхность мишени. Диаметр пятна составлял 460 мкм**.**

Процесс абляции проходил в дистиллированной воде, объем которой достигал 100 мл. Задавалось определенное количество импульсов в каждой точке мишени в интервале от 1 до 3500. Плотность энергии на поверхности мишени, при воздействии одно импульса:

$$P_{h0} = \frac{P}{S} = 30{,}98 \times 10^{12}\ {}^{\text{Вт}}/_{\text{м}^2}$$

$$P = \frac{E}{\tau} = 5 \times 10^{6}\text{Вт}$$

где P- мощность одного импульса, Вт;

E=0,05 Дж – энергия одного импульса;

S=161,4 x 10^{-9} $м^2$- площадь пятна воздействия лазерного излучения;

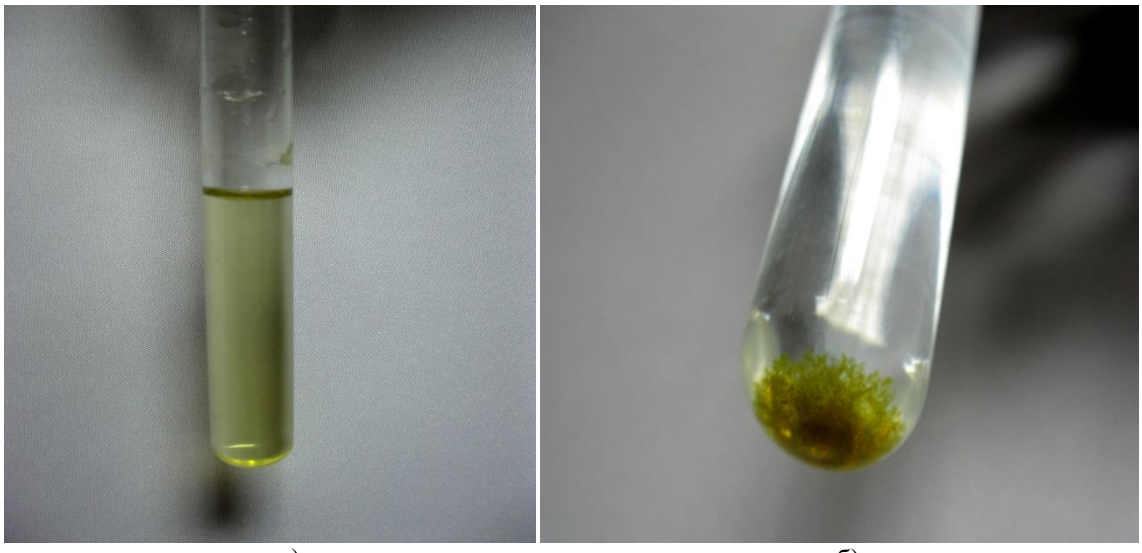
$\tau=10^{-8}$ с – длительность импульса.

Сдвиг мишени в новое положение после завершения импульсного воздействия в точке осуществлялся при помощи двухкоординатной системы перемещения. Схема обработки представляла собой испарение определенного объема материала в воду, в последствии отводимого потоком на мишень.

Для исследования топографии поверхности обработанной мишени использовался электронный микроскоп Olympus GX51, имеющий разрешение до 10 мкм.

Съемка процесса производилась на скоростную видео камеру Fastvideo-500M с последующей выборкой кадров. При съемке использовался оранжевый и UG11 фильтры для отсечения зеленого излучения, которое приводило к засвечиванию кадров. В ходе эксперимента зафиксирован процесс формирования плазменного облака при лазерном воздействии излучения на мишень, находящуюся в жидкой среде.

При воздействии лазерного излучения длиной волны 532 нм на латунную мишень был получен коллоидный раствор желтого оттенка. Рис.2.а). С течением времени наночастицы стали коагулировать и оседать на дне пробирки в виде гелеобразной субстанции. Рис.2.б). Данная субстанция называется золь гелем. Это коллоидная система, состоящая из жидкой дисперсионной среды, заключенной в пространственную сетку, образованную соединившимися частицами дисперсной фазы. Изменение внешних условий приводят к интенсивному образованию контактов между частицами и образованию монолитного геля. В нём молекулы растворителя (в нашем случае растворитель-вода) заключены в гибкую, но достаточно устойчивую трехмерную сетку, образованную частицами гидроксидов.

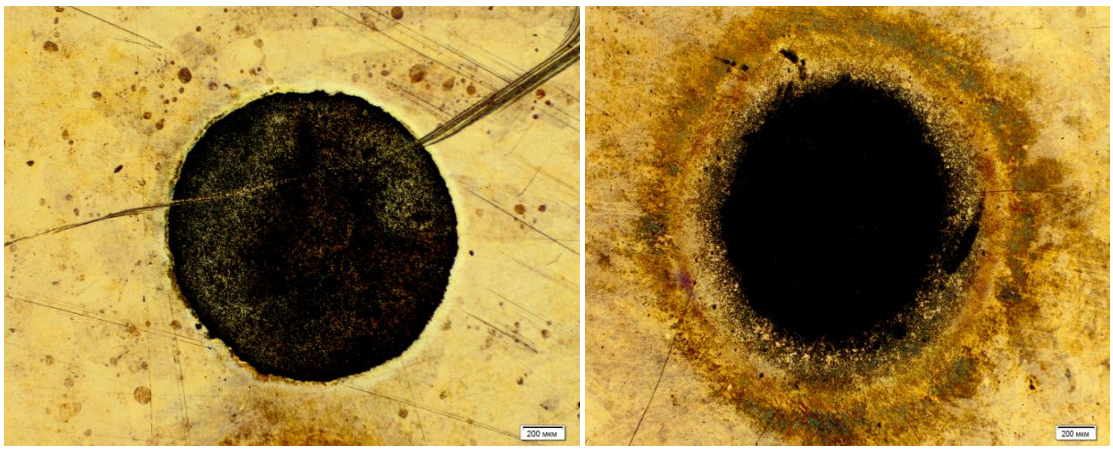


а) б)

Рис.2.а) коллоидный раствор латуни;
б) осевшие наночастицы латуни.

Опытным путем было доказано, что при механическом воздействии (перемешивании) гибкая связь в коллоидном растворе распадается. Происходит растворение геля. При прохождении определенного периода времени связи в коллоидной системе возобновляются.

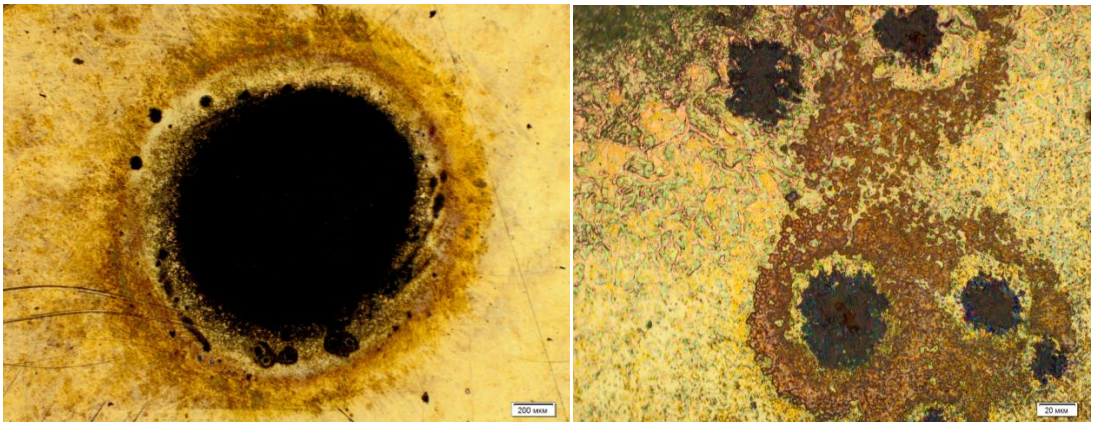
С увеличением количества импульсов, воздействующих на одно пространственное положение, изменяется топография поверхности. Начиная с 700 импульсов наблюдаются завихрения по границам пятна воздействия. Рис.3).



а) б)

Рис.3. Поверхность мишени после воздействия:а) одного импульса;
б) 700 импульсов.
Увеличение составляет 200 мкм.

При дальнейшем увеличении количества импульсов до 1000 точке в зоне термического влияния (ЗТВ) появляются включения, имеющие такую же глубину, как и центральная часть пятна. Рис.4. Возникновение данных включений может быть связанно с попаданием образовавшихся наночастиц в действующий поток лазерного излучения. Находясь повторно под воздействием лазерного излучения, наночастицы нагреваются и рассеивают часть энергии. Так же можно предположить, что часть выбитых частиц со дна кратера имеют меньшую энергетику, что приводит к их оседанию частиц непосредственно на поверхности мишени. Дальнейшее их движение невозможно.



а) б)

Рис.4.Поверхность мишени после воздействия 1000 импульсов: а) увеличение 50 крат;
б) увеличение 200 крат.

В момент воздействия луча высокой плотностью мощности происходит сублимация вещества подложки, это сопровождается микровзрывом, запечатленным скоростной видео камерой (Рис.5). При этом вблизи поверхности мишени повышается плотность газов, испаряемых лазерным излучением из окружающей среды жидкости (Рис.6).

Уже сформировавшийся коллоидный раствор продолжает взаимодействовать с газами, растворенными в жидкости. В нашем случае одним из таких газов является кислород. Происходит окисление наночастиц из-за их большой удельной поверхности. На (Рис.7) показана хронология протекания импульса, воздействующего на мишень.

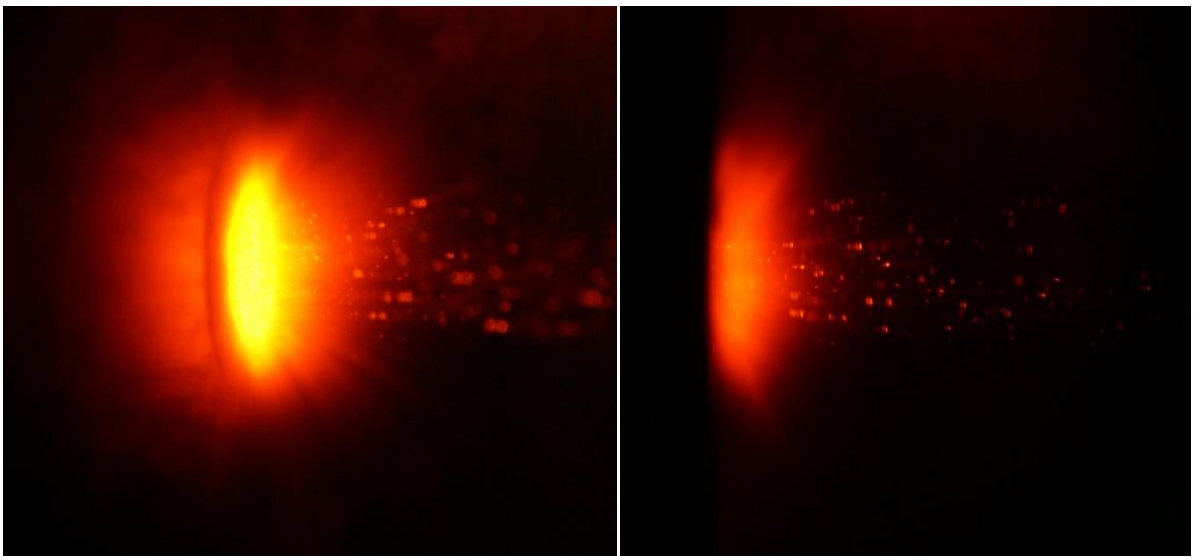


Рис.5. Взаимодействие лазерного пучка с поверхностью мишени. В процессе воздействия идет выделение кислорода воздуха из нагретой жидкости. Съемка производилась с использованием оранжевого фильтра.

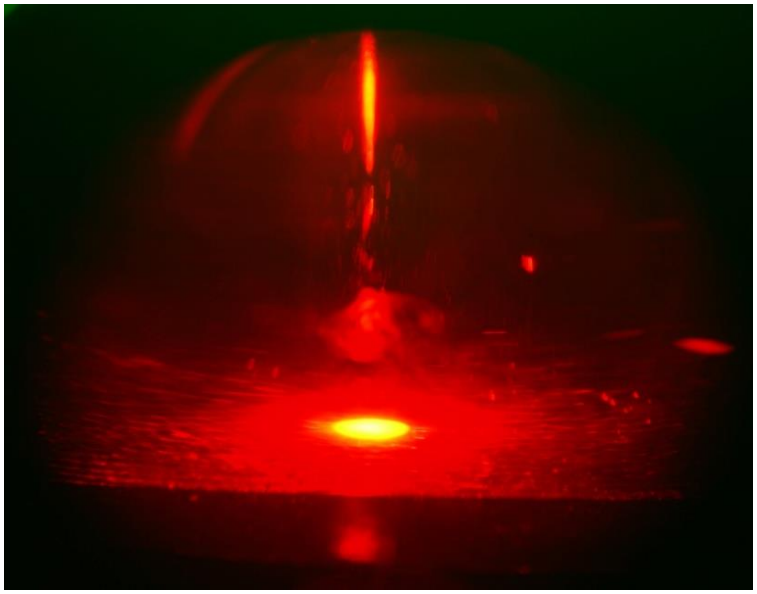


Рис.6. Образование границы между ванной расплава и образовавшимся газом окружающей среды.

На снимках видно, что разлет частиц происходит в жидкость в форме конуса, при маленьком диаметре луча (в фокусе) разлет очень узкий, в результате объем испаренного вещества небольшой. Значит рациональнее подбирать диаметр луча так, чтобы обеспечить максимальный объем сублимировнного за один импульс вещества. Этот диаметр обусловлен плотностью мощности на краю диаметра луча, воздействующего на подложку. Принимаем распределение мощности по пятну равномерным, поскольку поверхность на дне кратера, образованного импульсами испарения, плоская.

В Таблице1. представлена зависимость площади пятна воздействия лазерного излучения S от количества импульсов N.

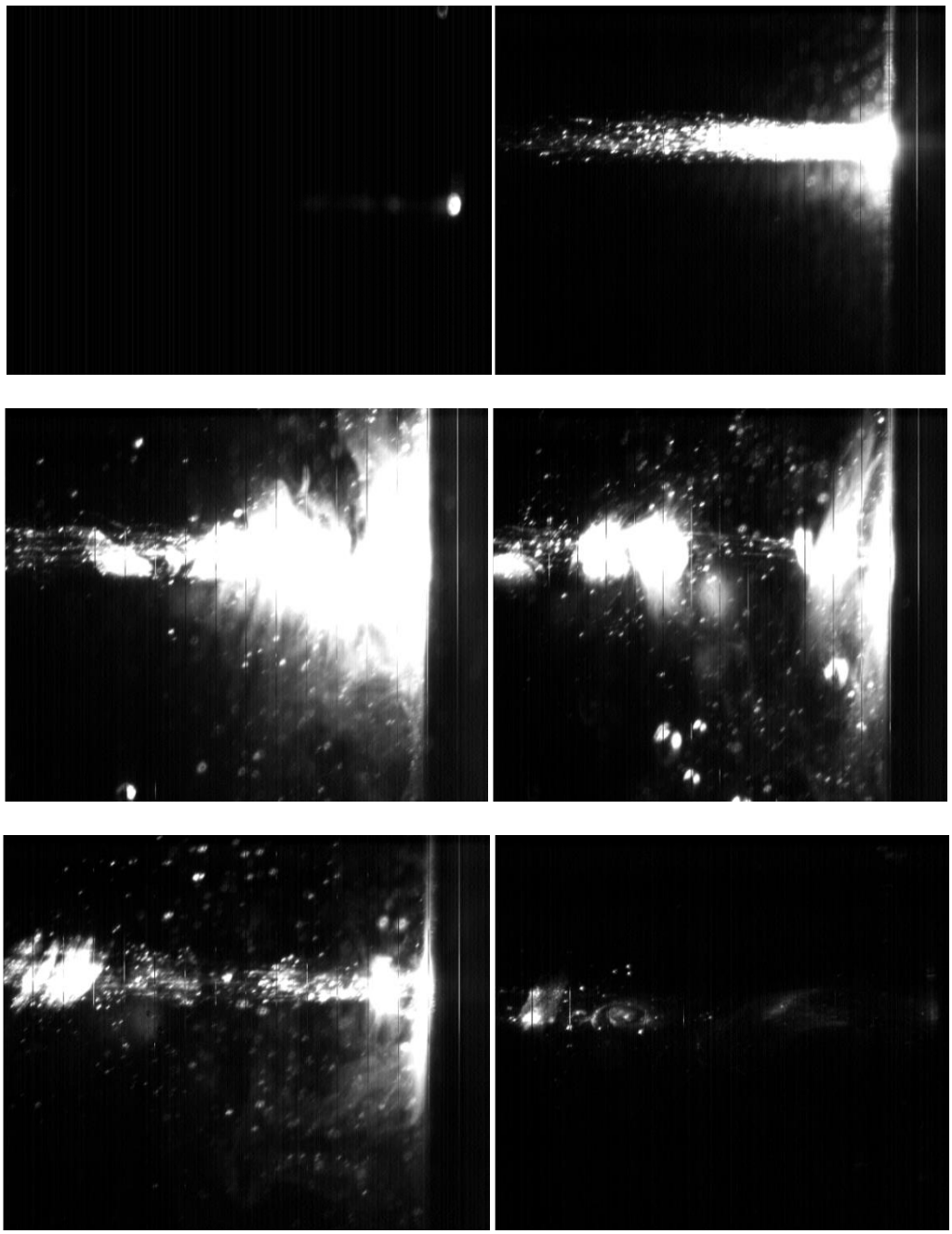


Рис.7. Процесс возникновения, протекания и затухания одного импульса в процессе лазерной абляции.

Таблица 1.

№ п/п	N	S,мм^2
1	1	0,161
2	2	1,987
3	5	1,728
4	10	1,516
5	50	1,577
6	100	1,638
7	200	1,453
8	300	1,581
9	400	1,609
10	500	2,041
11	600	1,291

12	700	1,429
13	800	1,644
14	1000	1,308
15	1500	1,326
16	2000	1,176
17	3000	1,744
18	3500	1,136

Анализируя полученные данные, заметим что наибольший размер площадь пятна взаимодействия достигает при 500 импульсах, после чего наблюдается постепенный спад. На основе полученных данных можно сделать вывод: при достижении 500 импульсов в коллоидном растворе находится уже достаточно высокое содержание наночастиц, которые попадают под воздействие лазерного излучения повторно при неоднократном прохождении импульсов. При этом частицы забирают на себя часть энергии лазерного излучения, что приводит к падению плотности мощности на поверхности мишени, и как следствие к уменьшению ванны расплава и площади пятна взаимодействия.

В ходе экспериментов было установлено, что характер получения коллоидных растворов – взрывоподобный. Плотность мощности на поверхности мишени достигает такого значения, которое позволяет испарить материал без наличия жидкой фазы. Так же установлено, что необходимо эффективно отводить коллоид из области вблизи мишени для уменьшения рассеяния излучения.

При продолжительном импульсном воздействии в одно пространственное положение наблюдается вылет наночастиц с малой энергетикой со дна каверны, которые остаются на поверхности мишени, так как из-за недостатка энергии неспособны двигаться дальше. Учитывая появление наночастиц с малой энергетикой при данном виде взаимодействия, можно сделать вывод, что прохождение лазерного излучения вдоль определенного контура по поверхности мишени было бы наиболее эффективным для получения коллоидных растворов.

Зафиксировано, что полученные наночастицы достаточно быстро коагулируют. При этом возникает гибкая связь, для разрушения которой хватает простого механического воздействия. Однако скорость осаждения частиц с течением времени непостоянна.

В дальнейшей работе планируется разработка технологии осаждения частиц на керамические подложки, получение коллоидного раствора латуни в этаноле.

Литература

1. Е. Е. Мешков, *Изв. АН СССР*, Механика жидкости и газа, 5 (1969), с. 151-158.
2. Е.В. Заведеев, А. В. Петровская, А. В. Симакин, Г. А. Шафеев, *Квантовая электроника*, 36(10) (2006), с. 978-980.
3. Z. Paszti, Z.E Horvath, G. Peto, A. Karacs, L. Guczi, Applied Surface Science 109/110 (1997), с. 67-73
4. П.В. Казакевич, Образование наночастиц при лазерной абляции металлов в жидкости, диссертация (2008), с. 48-81.
5. А.А Антипов, Лазерные методы получения и осаждения коллоидных систем на поверхности твердых тел, автореферат диссертации (2013), с. 4-5.

УДК 621.791.725

ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА КРИОГЕННЫХ СТАЛЕЙ

Пересторонин Александр Владимирович,
аспирант 1-го года,
кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»,
Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана

Научный руководитель: А. И. Мисюров,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении»

Изучение и применение оборудования, производящего холод при температуре ниже 120 K, началось в конце XIX века. С середины XX века его развитие получило импульс в связи с необходимостью получения и использования газов при низких температурах в системах охлаждения, химии, металлургии и других областях [4]. Однако наибольшее значение на сегодняшний день приобрело использование криогенного оборудования для получения сжиженных газов, в частности, природного газа. Температура его кипения составляет минус 163 °C [8]. Как правило, транспортировка и хранение газа осуществляется в жидком состоянии, что обуславливает необходимость создания специальных резервуаров для водного и наземного транспорта, а также стационарных емкостей.

Условия работы емкостей для сжиженного природного газа диктуют необходимость применения специальных материалов. Большинство широко применяемых конструкционных сталей работоспособны лишь в условиях атмосферного холода и для создания таких емкостей не используются. К материалам, используемым в резервуарах для хранения и транспортировки сжиженного природного газа, предъявляются следующие основные требования:

– высокие прочность и пластичность, как при температуре окружающей среды, так и при рабочей температуре;
– обеспечение длительной работоспособности при низких температурах;
– высокая коррозионная стойкость;
– технологичность;
– невысокая стоимость.

При создании криогенной техники используются высоколегированные аустенитные стали, а также ферритные стали, легированные никелем. Несмотря на относительно невысокую стоимость, последние не применяются при создании резервуаров для сжиженного природного газа ввиду относительно низких механических свойств и неудовлетворительной коррозионной стойкости. Наиболее широко используются хромоникелевые стали типа 08Х18Н10, однако, ввиду их высокой стоимости в последнее время для этих целей находят применение хромникельмарганцевые стали аустенитного класса, легированные азотом, в которых дорогостоящий никель частично заменен марганцем. Примером коррозионностойкой и хладостойкой стали, работающей в слабоагрессивных средах и при температурах до минус 196 °C, может служить сталь 03Х21Н5АГ7.

Основными процессами при создании резервуаров являются сварка под флюсом и аргонодуговая сварка, обеспечивающие стабильность состава и свойств металла по всей длине шва при сварке как с разделкой, так и без разделки кромок при формировании соединений в изделиях с толщиной металла от 3 до 50 мм. При этом сварка аустенитных сталей имеет ряд технологических сложностей.

Главной и общей особенностью сварки данных сталей является склонность к образованию в шве и околошовной зоне горячих трещин, имеющих межкристаллитный

характер. Они могут наблюдаться как в виде мельчайших микронадрывов, так и видимых трещин. Образование горячих трещин связано с формированием при сварке крупнозернистой макроструктуры, особенно выраженной в многослойных швах, когда кристаллы последующего слоя продолжают кристаллы предыдущего слоя, и наличием напряжений усадки. Для предупреждения перегрева металла и связанного с этим укрупнения структуры, возможности появления трещин и снижения эксплуатационных свойств сварного соединения рекомендуется выполнять сварку на небольших погонных энергиях.

Хромоникельмарганцевые стали склонны к сигматизации и охрупчиваются в случае выдержки при температурах от плюс 700 до плюс 800 °С, в связи с чем необходимо ограничивать время пребывания металла при этих температурах.

Целью данной работы была оценка возможности использования лазерной сварки для изготовления крупногабаритных конструкций из новой азотосодержащей криогенной хромоникельмарганцевой аустенитной стали.

Рассматриваемая сталь, имеет высокие механические и коррозионные свойства. Такой комплекс свойств достигается для аустенитных сталей при значительном изменении хромоникелевого эквивалента и при дополнительном легировании раствора с ГЦК решеткой некоторыми элементами (Mo, Mn, N и др.), позволяющими получить достаточный уровень ряда показателей свариваемости, то есть пригодности сталей к формированию крупногабаритных сварных конструкций.

При выборе способа и режима сварки данной стали следует учитывать, что упрочнение достигнуто смешанными карбидно-нитридными выделениями, а также марганцем. Этот же вид упрочнения должен иметь место и в металле шва. Пластичность стали при низкой температуре обеспечивается однофазной аустенитной структурой, однако при расплавлении дуговым источником и последующем охлаждении возможно наличие в металле шва δ-феррита. Повышение количества феррита, в отдельных случаях позволяющее повысить сопротивляемость образованию горячих трещин, недопустимо для швов в изделиях, применяемых при низких температурах, поскольку участки с объемноцентрированной решеткой при температурах ниже минус 100 °С склонны к хрупким разрушениям [3]. Поэтому для достижения высоких криогенных свойств металла шва в нем необходимо исключить наличие δ-феррита. Обычно этого добиваются путем увеличения никелевого эквивалента ($Ni_э$), однако увеличение $Ni_э$ за счет никеля или марганца способствует повышению склонности к образованию горячих трещин[9].

Однофазные аустенитные швы, как известно, обладают исключительной склонностью к горячим трещинам при сварке, что приводит к необходимости ограничения режимов сварки. Например, при использовании сварочных материалов типа 10Х16Н25М6, рекомендуемые параметры процесса дуговой сварки следующие: сварочный ток от 440 до 480 А, напряжение дуги от 28 до 34 В, скорость сварки от 20 до 25 м/ч. Превышение указанных режимов приводит к появлению горячих трещин. При этом для обеспечения равнопрочности сварного соединения необходимо формирование больших усилений швов, а также введение в сварочную проволоку элементов, обеспечивающих дополнительное дисперсионное упрочнение. Большое усиление шва и невысокие режимы сварки приводят к низкой производительности процесса при сварке больших толщин ввиду необходимости увеличения числа проходов.

Многослойные швы, также как и однослойные, имеют ярко выраженную направленную (транскристаллитную) макроструктуру. В случае многопроходной сварки кристаллиты каждого предыдущего слоя становятся основой кристаллизации последующих слоев. Вследствие этого наблюдается перерастание кристаллитов из одного слоя в другой. Существует непосредственная связь между величиной кристаллитов подложки и кристаллитов последующих слоев. Чем крупнее кристаллиты предыдущего слоя, тем крупнее кристаллиты последующих слоев, и наоборот.

Характерной особенностью микроструктуры сварных швов является их столбчатое ячеисто-дендритное или дендритное строение. Большая скорость кристаллизации обуславливает преимущественное развитие дендритной или микроскопической ликвации. Вследствие быстрого затвердевания и охлаждения сварного шва диффузия не успевает выровнять концентрацию легирующих элементов в осях и междуосных пространствах дендритов. Периодичность процесса кристаллизации приводит к тому, что периоды роста столбчатого кристалла чередуются с остановками, из-за чего развивается послойная ликвация, а сварные швы отличаются слоистым строением и сравнительно слабо выраженной зональной ликвацией. Известно, что ликвация между кристаллизационными слоями наиболее сильно проявляется в периферийных участках шва, где скорость кристаллизации сварочной ванны наибольшая. Зональная же ликвация проявляется во внутренних объемах шва, затвердевающих в последнюю очередь и наименьшей скоростью.

В сварных высоколегированных швах с однородной аустенитной структурой после завершения кристаллизации в процессе охлаждения может развиваться физическая неоднородность в виде новых границ [6], что приводит к снижению высокотемпературной прочности и пластичности металла. Эти границы проходят как вдоль срастания кристаллитов и обогащения дендритов, так и пересекая их. В участках совпадения вторичных границ с зонами обогащения ячеек (дендритов), то есть в местах совпадения химической и физической неоднородностей металла шва, происходит наибольшее снижение его высокотемпературной пластичности и прочности.

Особую сложность представляет сварка больших толщин в изделиях из криогенных аустенитных сталей. При толщине более 5 мм выполнение сварки за один проход недопустимо из соображений минимизации погонной энергии. В тоже время, многопроходная сварка аустенитных сталей связана с проблемой возникновения трещин в предыдущих слоях при наложении последующих.

Анализ качества многопроходных швов показал, что в них имеют место две разновидности горячих трещин. Первая из них возникает в процессе кристаллизации металла шва; такие трещины выходят на поверхность шва, легко обнаруживаются современными методами контроля, могут быть удалены вырубкой или заваркой. В корневых проходах появление их обусловлено неблагоприятной схемой кристаллизации, которая в случае полного провара близка к линейной. В последующих проходах появление кристаллизационных трещин может вызываться чрезмерным увеличением режимов сварки. Увеличение скорости сварки приводит к смене вида макроструктуры, например, объемной схемы кристаллизации на плоскую. Повышение сварочного тока вызывает огрубление структуры металла шва и увеличение ширины ликвационных прослоек. Такие изменения структуры снижают сопротивляемость металла шва образованию кристаллизационных трещин.

Трещины второго типа наблюдаются в металле предыдущих проходов и залегают от линии сплавления предыдущего шва с последующим вглубь предыдущего [7]. Трещины располагаются в пределах одного слоя шва и, как правило, не пересекают линию сплавления двух слоев (рисунок 1). Наибольшая частота их появления – в месте соприкосновения двух верхних слоев в нижележащем слое, то есть в зоне литого металла шва, который претерпел как минимум двухкратный термодеформационный цикл от повторного воздействия сварочного источника тепла.



Рис. 1. Характер расположения трещин в зоне оплавления отдельных валиков (св. проволока типа Х15Н23М4В4)

При многослойной сварке происходит повторный дуговой нагрев ранее закристаллизовавшегося металла шва. Повторное термодеформационное воздействие обуславливает развитие процессов термического и деформационного старения в литом металле ранее уложенного шва. В волокнах, различно удаленных от зоны сплавления двух валиков и имеющих различную температуру нагрева, степень завершенности процессов старения будет различна, что приводит к существенному различию свойств этих зон. В общем случае при старении из пересыщенного твердого раствора выделяется фаза, отличающаяся от матрицы химическим составом и структурой.

Повторный дуговой нагрев литого металла шва при выполнении последующих проходов должен привести к выделению карбидов и карбонитридов по границам аустенитного зерна.

На рисунке 2 приведены фотографии участков околошовной зоны по мере удаления от линии сплавления. Вблизи линии сплавления происходит усиленное выделение карбидов и выстраивание их в стенки вдоль границ аустенитных зерен, сопровождающееся упрочнением. По мере удаления от линии сплавления эти протяженные выделения приобретают прерывистый характер. В металле шва не подвергавшемуся высокотемпературному нагреву (приблизительно 2 мм от линии сварки) наблюдается их хаотичное расположение. Обнаруженные выделения могут служить очагами хрупкого разрушения при межзеренном скольжении и, по-видимому, способствуют появлению трещин при повторном дуговом нагреве.

Помимо возможности образования горячих трещин, при сварке аустенитных сталей имеются дополнительные сложности. Серьезной проблемой является снижение коррозионной стойкости в зоне термического влияния. Это вызывается возникновением межкристаллитной коррозии. При длительной выдержке металла в температурном интервале от плюс 400 до плюс 900 °С происходит выпадение карбидов хрома по границам зерен, что вызывает образование обедненных хромом пограничных областей с пониженной химической стойкостью [5].

Следует указать также такие проблемы сварки аустенитных сталей, как повышенные остаточные напряжения и деформации ввиду отсутствия фазовых превращений в твердом состоянии, а также, особенно при сварке азотосодержащих сталей, возможность порообразования.

Таким образом, при дуговой сварке хромникельмарганцевых аустенитных сталей возможны следующие явления, отрицательно сказывающиеся на работоспособности конструкции резервуара: возникновение горячих трещин, коррозионное разрушение металла зоны термического воздействия, широкая область действия высоких остаточных напряжений, значительные деформации и возможность порообразования.

Одним из эффективных методов повышения качества сварных швов из аустенитных сталей в криогенном оборудовании может стать применение высококонцентрированных источников энергии, например, лазерного излучения.

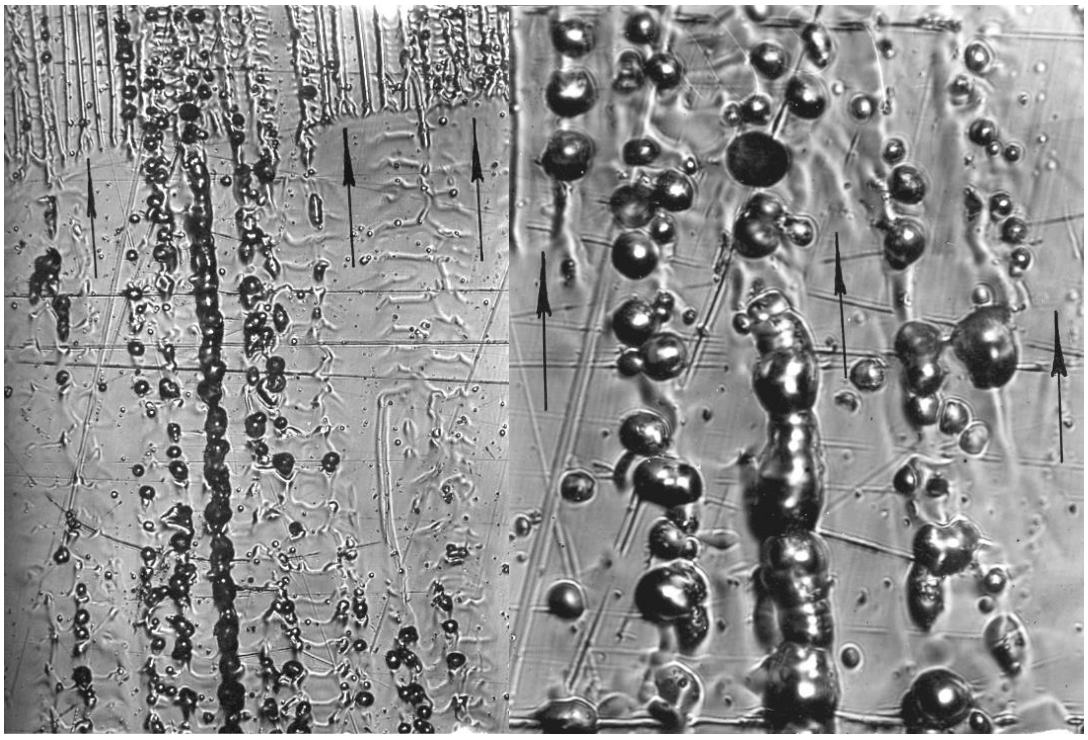
Известны данные о том, что измельчение структуры способствует повышению технологической прочности [2] и улучшению механических свойств при низких температурах [10].

Металлографические исследования показали, что расстояние между осями дендритов 1-го порядка при лазерной сварке сокращается почти в 4 раза по сравнению с его значением при дуговой сварке, расстояние между осями дендритов 2-го порядка – примерно в 2 раза (рисунок 3).

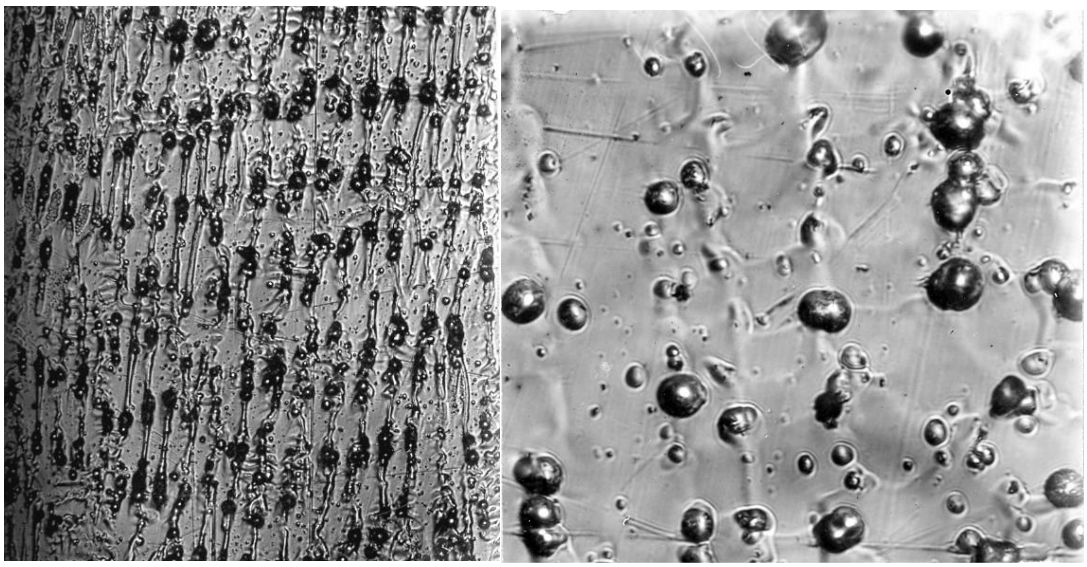
Важным преимуществом лазерной сварки является возможность выполнения шва за один проход, что позволит исключить возникновение трещин повторного нагрева.

Применение лазерной сварки может позволить существенно повысить коррозионную стойкость зоны термического влияния, поскольку, с одной стороны, существенно снижается ее протяженность, с другой – время пребывания металла в интервале температур активного выпадения карбидов.

Так, при дуговой сварке рассматриваемых сталей ширина зоны термического влияния составляет по данным металлографических исследований 750 мкм, при лазерной – менее 30 мкм. На рисунке 4 представлены зоны термического влияния при лазерной и дуговой сварке.



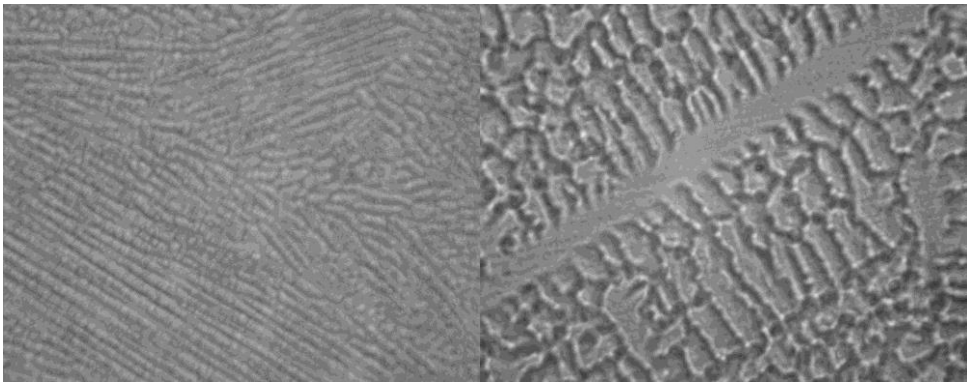
а б



в г

а – у линии сплавления (ЛС), х300; б – у ЛС, х1200
в – 2 мм от ЛС х300; г – 2 мм от ЛС х1200

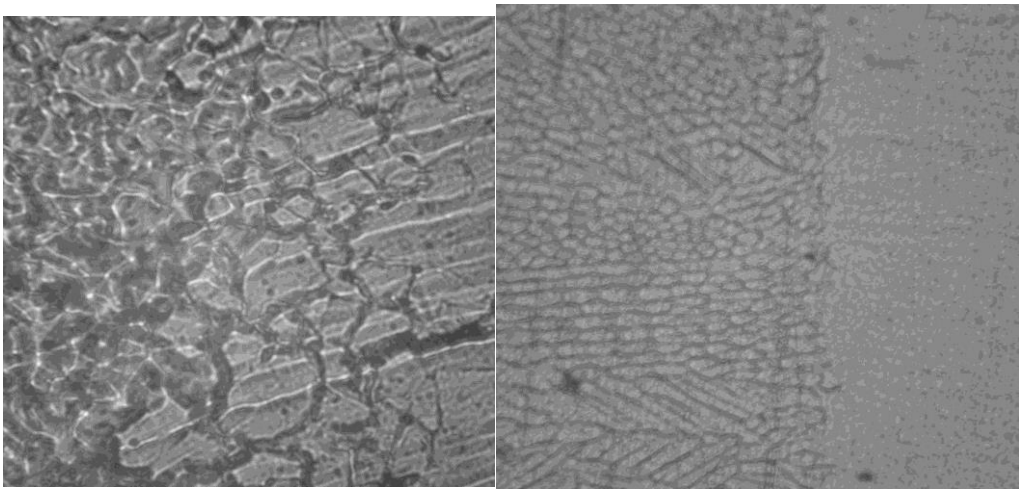
Рис. 2. Сегрегации в зоне металла шва, подвергнутому повторному дуговому нагреву, по мере удаления от линии сплавления



а) б)

а) – лазерная сварка, увеличение х 500; б) – дуговая сварка, увеличение х 500

Рис. 3. Микроструктура металла шва криогенной аустенитной стали

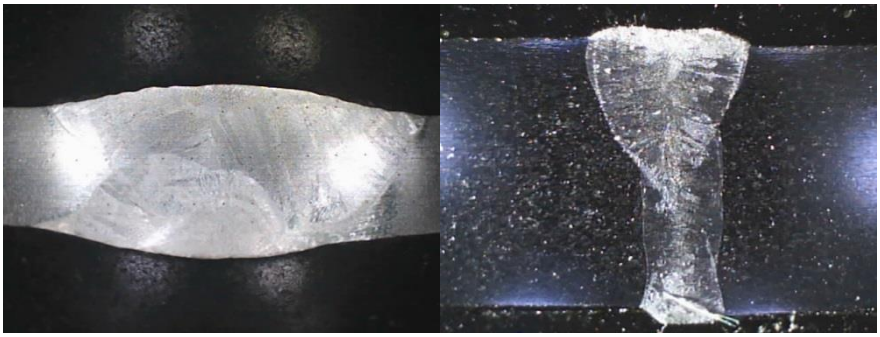


а) б)

а) – дуговая сварка, увеличение х 500; б) – лазерная сварка, увеличение х 500

Рис. 4. Граница основного металла и металла шва при дуговой и лазерной сварке аустенитной криогенной стали

Кроме параметров микроструктуры, на технологическую прочность и механические характеристики сварного соединения влияют его размеры и форма, а также особенности кристаллизации металла. В работе [1] показано, что особенности формы сварочной ванны и затвердевания металла при лазерной сварке положительно влияют на технологическую прочность сварных швов. Кроме того, размеры шва при лазерной сварке существенно меньше, чем при дуговой. Так, ширина шва при сварке образцов толщиной 3 мм из аустенитной криогенной стали лазером составляет 600 мкм, дугой – 6500 мкм. На рисунке 5 показаны макроснимки швов, выполненных лазерной и дуговой сваркой на образцах из аустенитной криогенной стали толщиной 3 и 4 мм соответственно.



а б

Рис. 5. Форма шва при дуговой (а) и лазерной (б) сварке аустенитной стали

На основе всего вышеизложенного можно сделать следующие основные выводы:

– при сварке хромникельмарганцевых аустенитных сталей возможны образование кристаллизационных и подсолидусных трещин, снижение коррозионной стойкости зоны термического влияния и другие нежелательные явления;

– переход к применению процесса лазерной сварки, за счет снижения размеров шва и зоны термического влияния, выполнения шва за один проход, а также повышения дисперсности структуры металла должно позволить существенно повысить технологическую прочность и некоторые эксплуатационные параметры сварных соединений в конструкциях из хромникельмарганцевых аустенитных сталей.

Литература

1. *Гаврилюк В. С., Григорьянц А. Г., Иванов В. В., Щеглов М. Е.* Особенности кристаллизации шва при лвзерной сварке // Автоматическая сварка, 1983, № 6, с. 27 – 29.
2. *Григорьянц А Г., Грезев А. Н., Федоров В. Г.* и др. Сравнение технологической прочности соединений, выполненных лучевыми и дуговыми способами сварки. // Автоматическая сварка, 1980, № 10, с. 11 – 14.
3. *Каховский Н. И.* Сварка нержавеющих сталей. – Киев, Техніка, 1968 – 312 с.
4. *Новотельников В. Н., Суслов А. Д. Б., Полтараус В. Б.* Криогенные машины: Учебник для вузов по спец. «Техника и физика низких температур». – Спб.: Политехника, 1991 г. – 335 с.: ил.
5. *Смирнов И. В*. Сварка специальных сталей и сплавов: Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Издательство «Лань», 2012. – 272 с.: ил.
6. *Чернышова Т.А*. Границы зёрен в металлах сварных соединений. М.: Наука, 1986. − 125 с.
7. *Якушин Б.Ф. Мисюров А.И.* Технологическая прочность многослойных швов со стабильно-аустенитной структурой. // Автоматическая сварка, 1983, №6, с.22 – 26.
8. ESAB Шведская промышленность, статья «Сварные танки для сталей 5 % и 9 % никеля для сжиженного природного газа»

9. *Jakhushin B*., Morphology of hot cracks in single-phase weld metal. Hot cracking phenomena in welds, Berlin: Springer, 394 p.
10. *Motomichi Koyama*, Taekyung Lee, Chong Soo Lee, *Kaneaki Tsuzaki*. Grain refinement effect on cryogenic tensile ductility in a Fe–Mn–C twinning-induced plasticity steel. Materials and Design 49 (2013) – p. 234 – 241.

УДК 621.375.826

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ ГАЗОПОРОШКОВОГО ПОТОКА И ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ОДИНОЧНЫХ ВАЛИКОВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ

Алеся Константиновна Шелестова,
студентка 4 курса,
кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: П.Е. Самарин
Ассистент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении»

1. Введение

Лазерная наплавка – один из ведущих способов восстановления поверхности деталей. Для осуществления процесса наплавки необходимо учитывать множество факторов, влияющих на качество наплавленного слоя – валика. Помимо лазерного излучения необходимо учитывать потоки газопорошковых смесей, взаимодействие частиц с материалами технологической оснастки и т.д. [1] Также важным является дальнейшее исследование свойств полученных валиков.

При наплавке основной материал оплавляется, поэтому наплавленный валик отличается по химическому составу от наплавочного материала. Это имеет место даже в верхних валиках, где влиянием перемешивания можно пренебречь [2]. Однако, для получения качественного многослойного покрытия следует учитывать этот фактор.

Для характеристики наплавленного валика используют такие геометрические параметры как: ширина наплавленного слоя W, высота наплавленного слоя H и глубина подплавления h (рисунок 1). Для оценки доли основного металла в наплавленном валике используют коэффициент перемешивания:

$$D = \frac{F_O}{F_H + F_O}, \qquad (1)$$

где F_O - площадь подплавленного основного металла, F_H – площадь наплавленного металла.

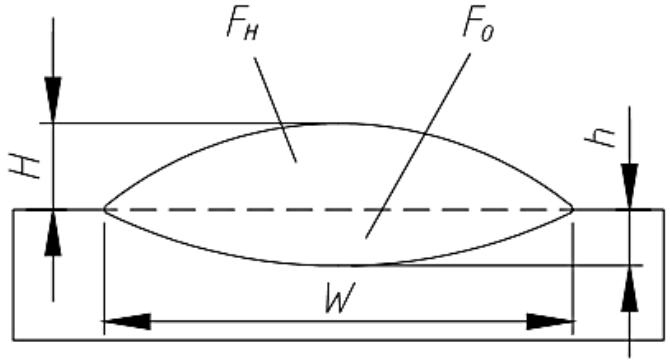


Рисунок 1. Геометрические параметры наплавленного валика: F_O - площадь подплавленного основного металла; F_H– площадь наплавленного металла; H – высота наплавленного слоя; h – глубина подплавления; W – ширина наплавленного слоя

Для получения высокого качества покрытия необходимо, чтобы коэффициент перемешивания был достаточно низким [3].

В данной работе было исследовано влияние положения фокуса газопорошкового потока при использовании различных насадок для наплавки на коэффициент перемешивания. Для исследования использовали наплавочный порошковый материал из нержавеющей стали и алюминиевого сплава.

2. Исследование

Для проведения исследования были выбраны наиболее применяемые для восстановления деталей порошковые материалы: нержавеющая сталь SS316L и алюминиевый сплав Al12Si. Их характеристики приведены в таблице 1. Для стабилизации расхода и потока порошка производили отсев более мелких фракций (40-60 мкм). Внешний вид частиц порошка представлен на рисунках 2 и 3. В качестве подложки были использованы сталь Ст3 (образец №1) и алюминиевый сплав АМГ 6 (образец №2) для соответствующих порошков.

Таблица 1. Параметры порошков

Марка	Размер частиц	Плотность материала, г/см^3	Форма частиц
SS 316 L	-63 +40	8,2	Сферические
Al12Si	-80 +50	2,5	Овальные, с сателлитами

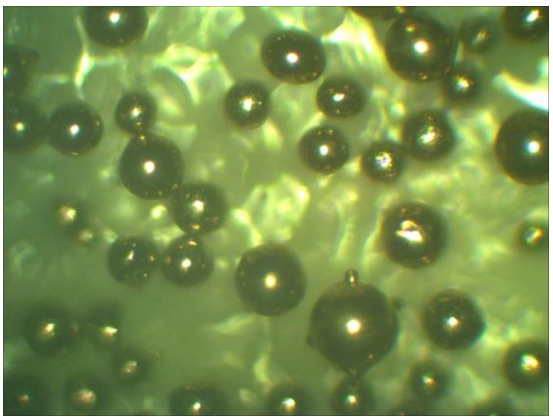


Рисунок 2. Частицы порошка стали SS 316 L, увеличение 100 крат

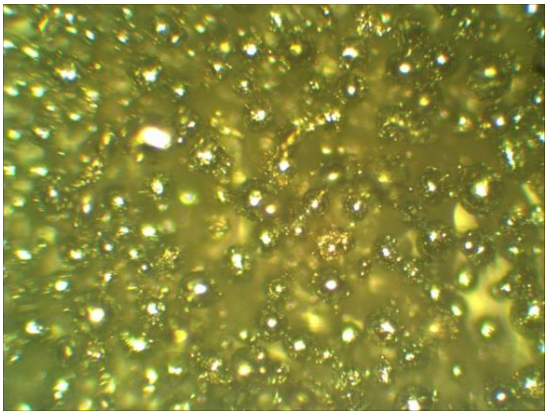
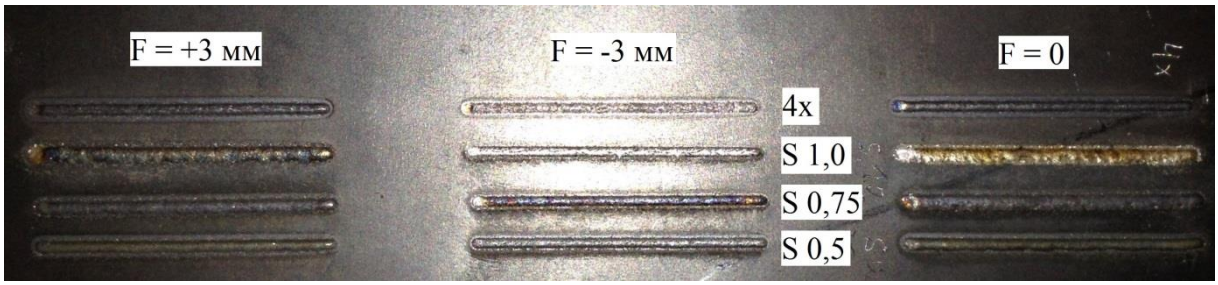


Рисунок 3. Частицы порошка алюминиевого сплава Al12Si

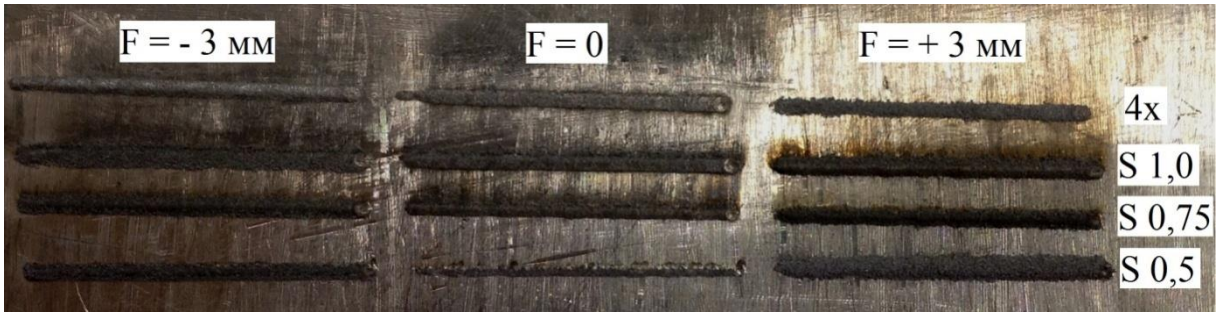
В данной работе использовалось следующее оборудование: порошковый питатель GTV, 4-кВт иттербиевый волоконный лазер, наплавочная голова YC 52, технологические

насадки в виде конусов с различными диаметрами выходных отверстий. Лазерный луч был сфокусирован над поверхностью подложки в пятно диаметром 2 мм с плотностью мощности $q = 3{,}2 \cdot 10^4$ Вт/см^2.

На подложку были нанесены серии валиков (рисунок 4): в фокусе газопорошкового потока, с заглублением потока на 3 мм и с приподнятым на 3 мм фокусом относительно подложки(рисунок 5). Причем для каждого положения фокуса были применены по 4 насадки для подачи порошка: четырехструйная и 3 вида коаксиальных (рисунок 6).



а)



б)

Рисунок 4. Образец №1 (а), образец №2 (б)

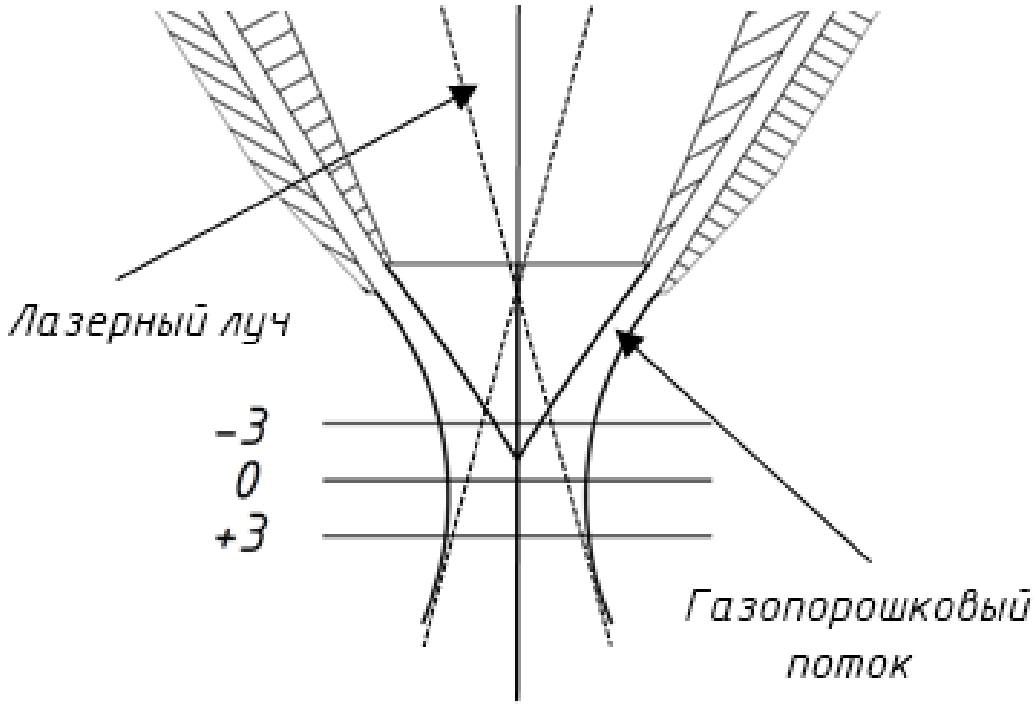


Рисунок 5. Схема положения фокуса газопорошкового потока относительно подложки: с заглублением фокуса (F = -3 мм), с приподнятым фокусом (F = +3 мм) и в фокусе газопорошкового потока (F = 0)

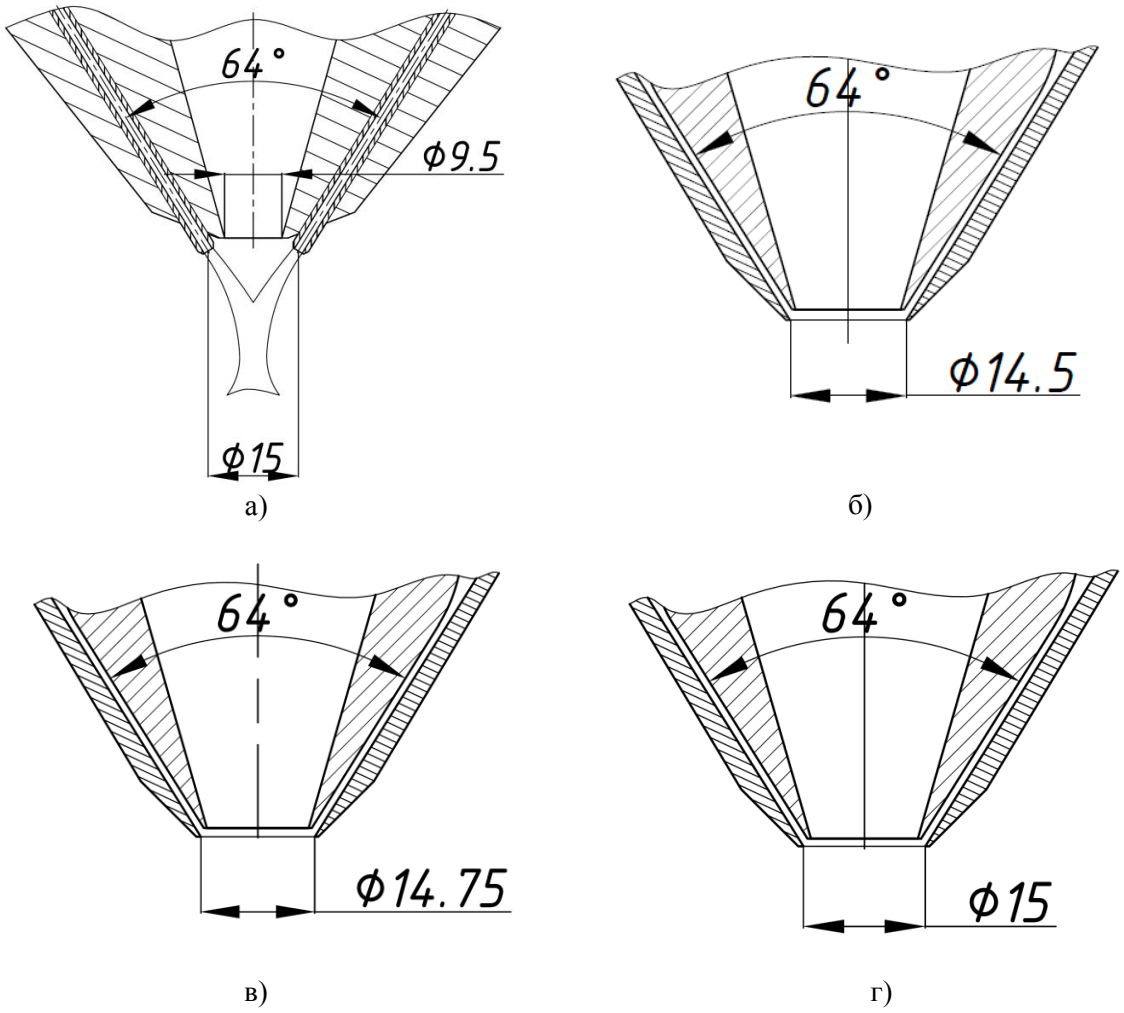


Рисунок 6. Эскизы рабочей части сопла с различными насадками для: четырехструйной подачи порошка (а) и коаксиальной подачи порошка (б - S 0,5; в - S 0,75; г - S 1,0)

В зависимости от положения фокуса газопорошкового потока относительно подложки на обрабатываемую поверхность попадает порошок, либо попавший под излучение лазера и нагретый им, либо не попавший под излучение и доставленный непосредственно в ванну расплава в не нагретом состоянии. В случае с "заглублением" фокуса потока порошок попадает в ванну не нагретым, а луч значительно подплавляет основу. В случае с "приподнятым" фокусом порошок попадает в ванну расплава нагретым, а глубина подплавления основы резко снижается. В результате положение фокуса в общем случае влияет как на форму полученного валика, так и на глубину подплавления основы.

Исследование формы и размеров полученных валиков, а также твердости наплавленного материала проводилось металлографическим методом. Для исследований образцы были разрезаны в поперечном сечении валиков, механически отполированы и химически протравлены. Твердость измерялась по методу Виккерса на микротвердомере с шагом 0,05 мм от поверхности валиков.

3. Результаты исследований

3.1. Формообразование валиков и коэффициент перемешивания

На рисунках 7-10 представлены результаты исследований образца №1, на рисунках 11-14 - образца №2.



а) F = +3 мм



б) F = 0

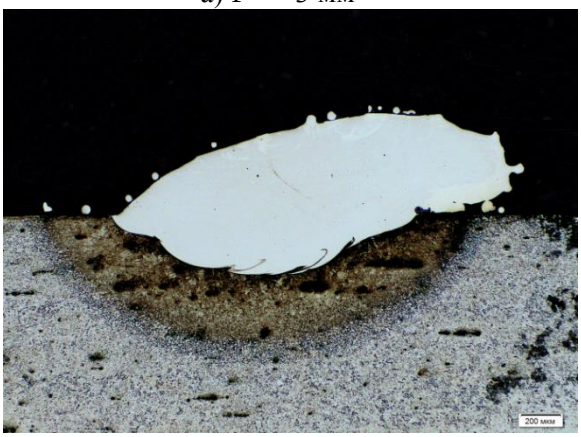


в) F = -3 мм

Рисунок 7. Насадка S 0.5



а) F = +3 мм

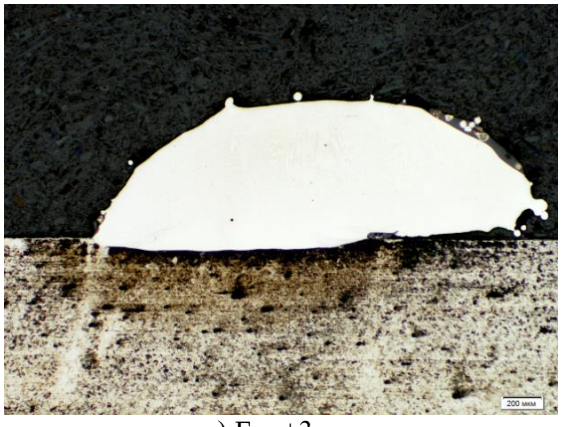


б) F = 0

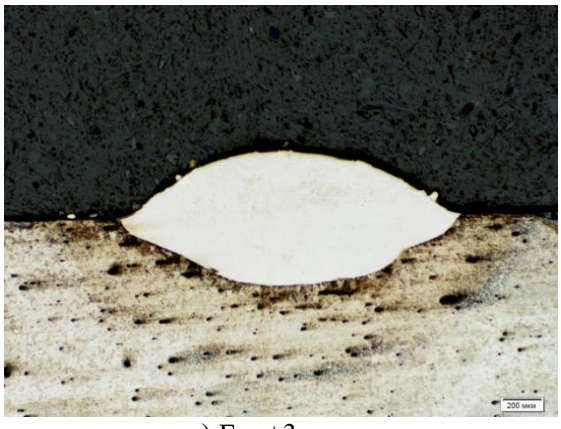


в) F = -3 мм

Рисунок 8. Насадка S 0.75



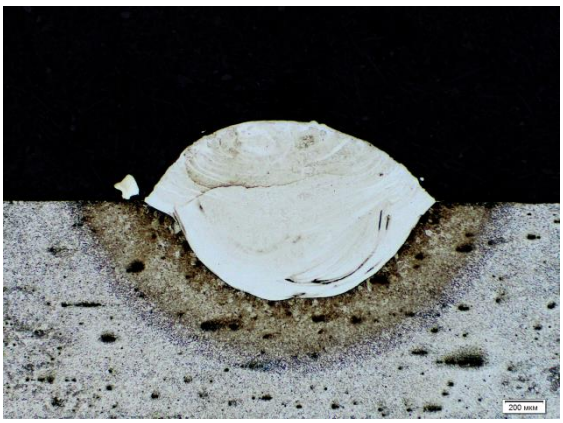
а) F = +3 мм



а) F = +3 мм



б) F = 0

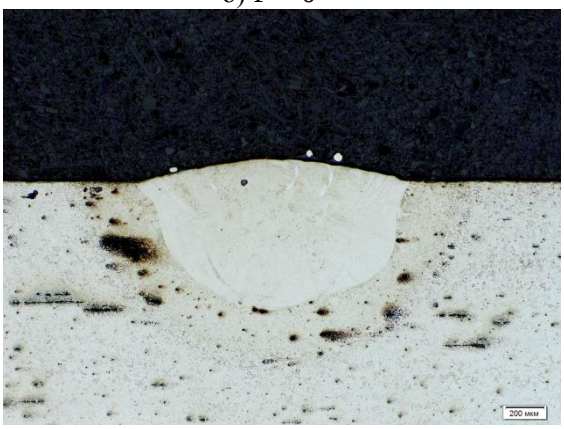


б) F = 0



в) F = -3 мм

Рисунок 9. Насадка S 1.0



в) F = -3 мм

Рисунок 10. Четырехструйная насадка

Из рисунков 7-10 видно, что с "заглублением" фокуса газопорошкового потока глубина подплавления основы растет на всех видах технологических насадок. Наибольшая глубина подплавления, не зависимо от заглубления фокуса газопорошкового потока, проявляется на четырехструйной насадке, поскольку газопорошковый поток на ней наиболее широкий и поглощение излучения порошком минимально. Наиболее высокий валик получен на сопле с минимальным диаметром выходного отверстия (S 0.5, см. рисунок 7,б). Несимметричные валики (рисунок 8, а) и б) и рисунок 9, а) и б)) получены по причине несоосности газопорошкового потока на исследованных насадках.

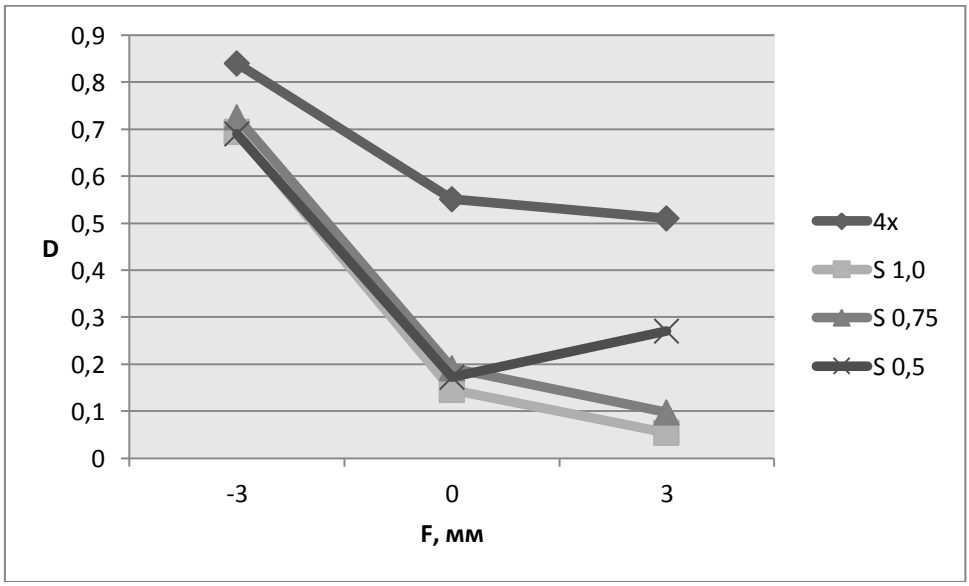


Рисунок 11. Коэффициент перемешивания D образца №1

Из рисунка 11 видно, что минимальный коэффициент перемешивания получен при использовании насадки S 1,0. Но следует учесть, что форма валиков в этом случае асимметрична. Таким образом, с учетом необходимости получения наименьшего коэффициента перемешивания и симметричной формы валика для наплавки валиков из нержавеющей стали SS 316 L на подложку из стали Ст3 следует выбирать технологическую насадку S 0,5 с расположением фокуса газопорошкового потока на поверхности подложки.

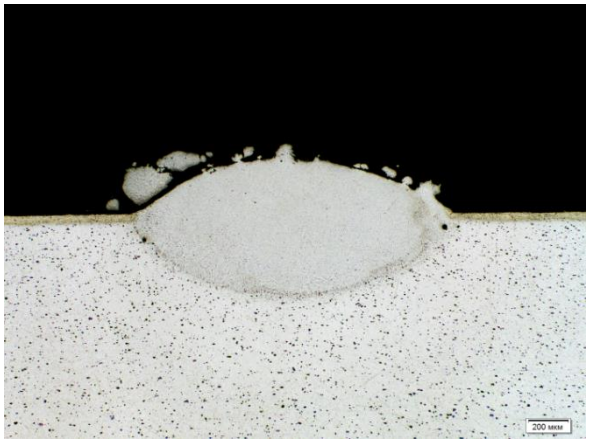
Характер изменения формы валиков из алюминиевого сплава не одинаков для всех технологических насадок. Так, из рисунков 12-15 видно, что с "заглублением" фокуса газопорошкового потока глубина подплавления растет при использовании насадок S 1,0 и четырехструйной. При использовании насадок S 0,5 и S 0,75 глубина подплавления максимальна в положени фокуса газопорошкового потока на поверхности подложки. Валик с максимальной высотой наплавленного слоя был получен при использование насадки с максиамальным диаметром выходного отверстия (S 1,0, см. рисунок 14,а).

Пористость при наплавке четырехструйной насадкой вызвана неэффективной подачей легкого алюминиевого порошка. Также при использовнии этой насадки в любом положении фокуса газопорошкового потока валики из алюминиевого сплава имеют минимальную высоту наплавленного слоя.

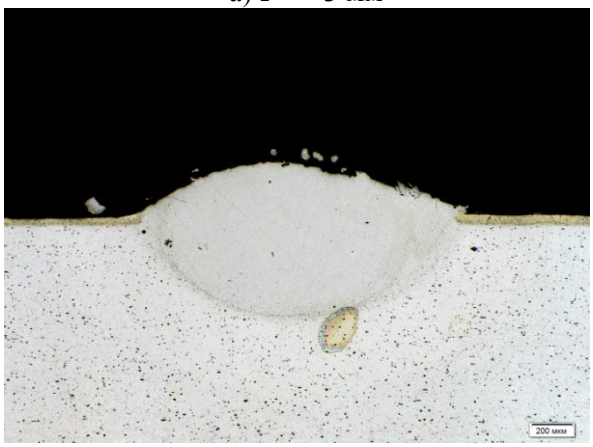
Минимальный коэффициент перемешивания для образца из алюминиевого сплава получен при использовании насадки S 1,0 с расположением фокуса газопорошкового потока над поверхностью подложки. Применение этой насадки также благоприятно для получения симметричной формы валика.



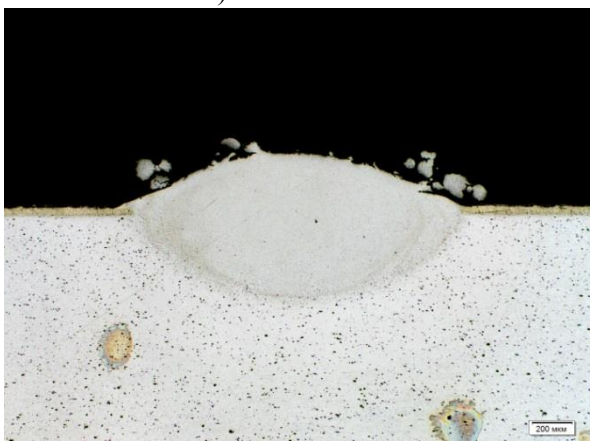
а) F = +3 мм



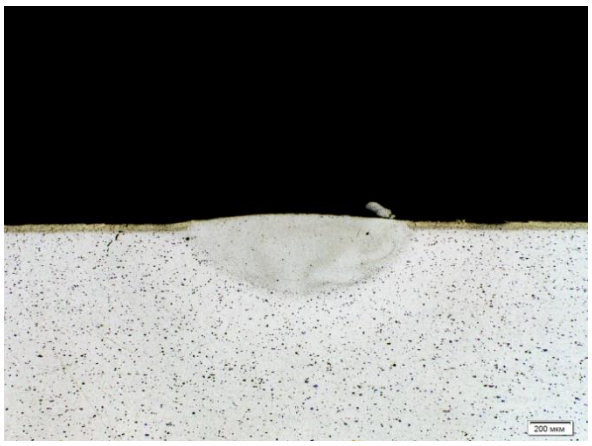
а) F = +3 мм



б) F = 0

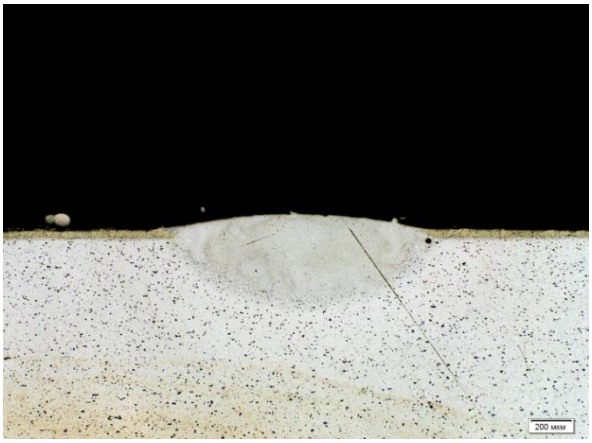


б) F = 0



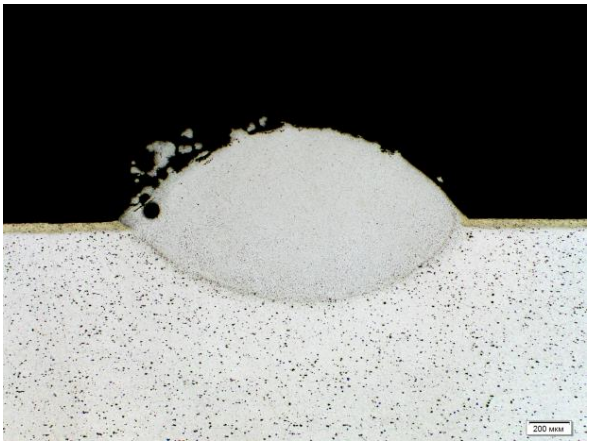
в) F = -3 мм

Рисунок 12. Насадка S 0.5

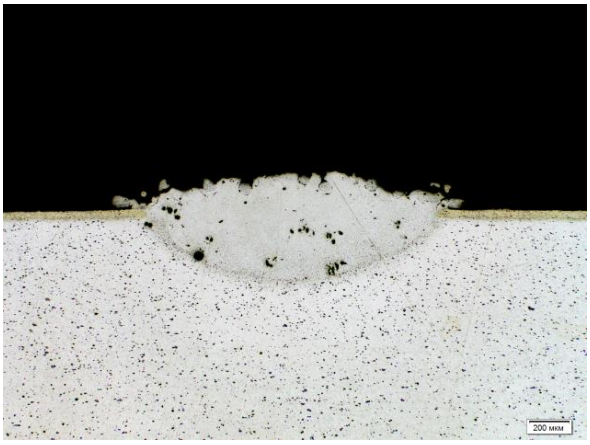


в) F = -3 мм

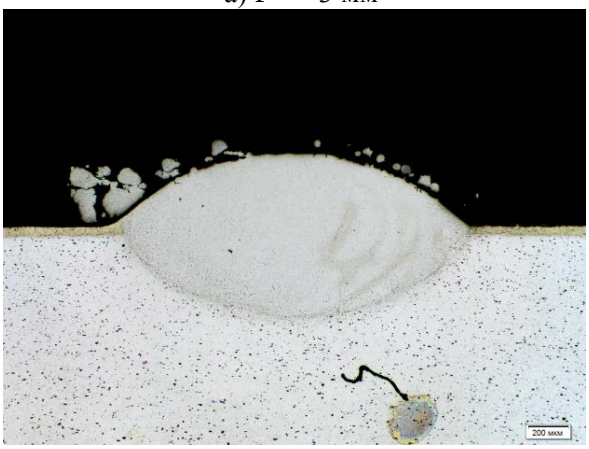
Рисунок 13. Насадка S 0.75



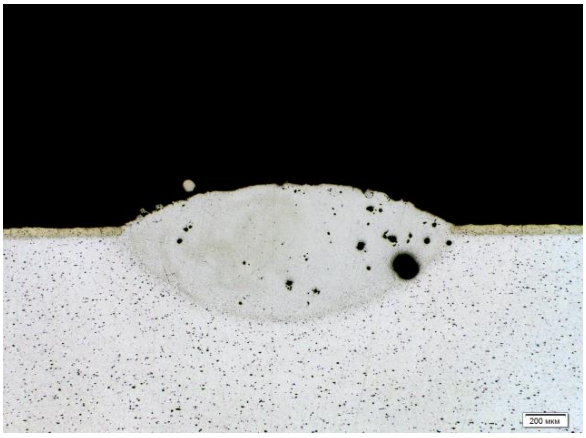
а) F = +3 мм



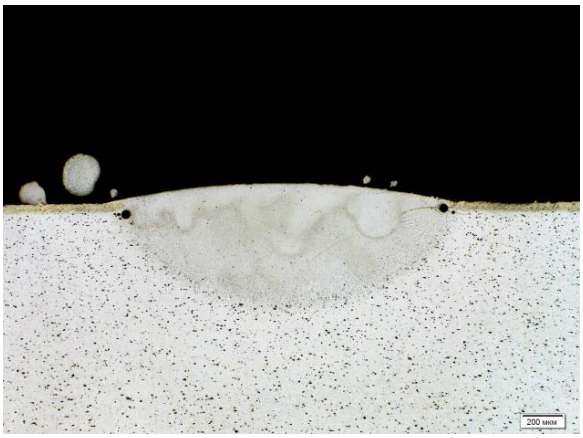
а) F = +3 мм



б) F = 0

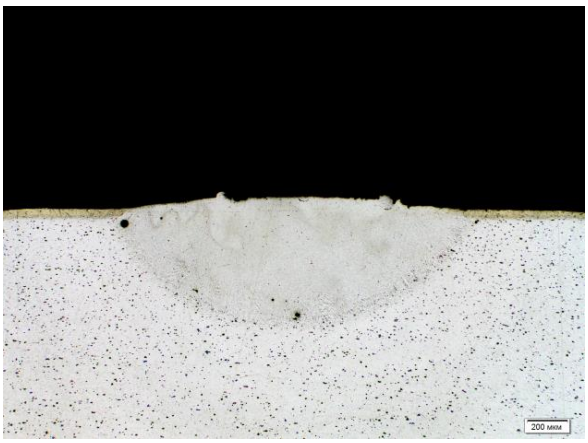


б) F = 0



в) F = -3 мм

Рисунок 14. Насадка S 1.0



в) F = -3 мм

Рисунок 15. Четырехструйная насадка

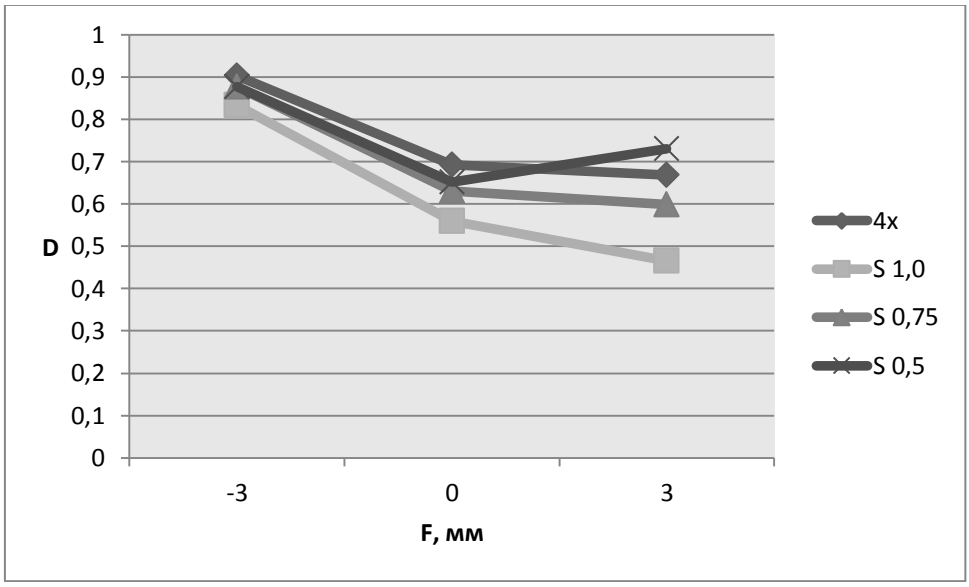


Рисунок 16. Коэффициент перемешивания D образца №2

1.2. Микротвердость наплавленных материалов

Схема измерения микротвердости представлена на рисунке 17. Измерения проводились от поверхности наплавленного слоя к подложке. Поскольку толщина наплавленного слоя на разных насадках различалась, зона скачкообразного изменения микротвердости (переход от наплавленного металла к основе) отстоит от поверхности на разных расстояниях. Кроме того, средняя твердость наплавленного валика зависит от доли растворенного в ней металла основы и связана с коэффициентом перемешивания. На алюминиевых сплавах данный факт заметен меньше, поскольку металлы основы и присадочного материала похожи по механическим свойствам. Упрочнение наплавленного металла в данном случае вызвано закалкой.

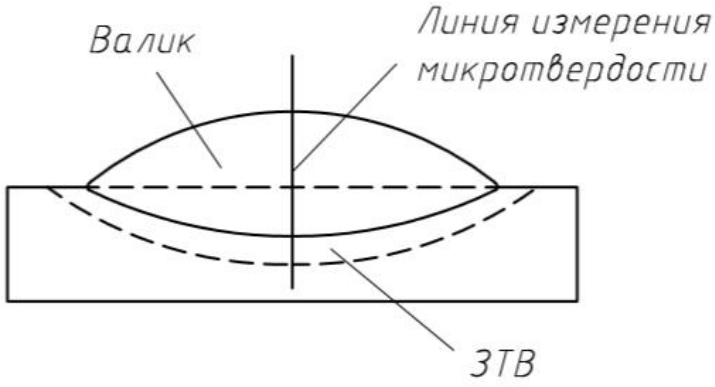


Рисунок 17. Схема измерения микротвердости валиков

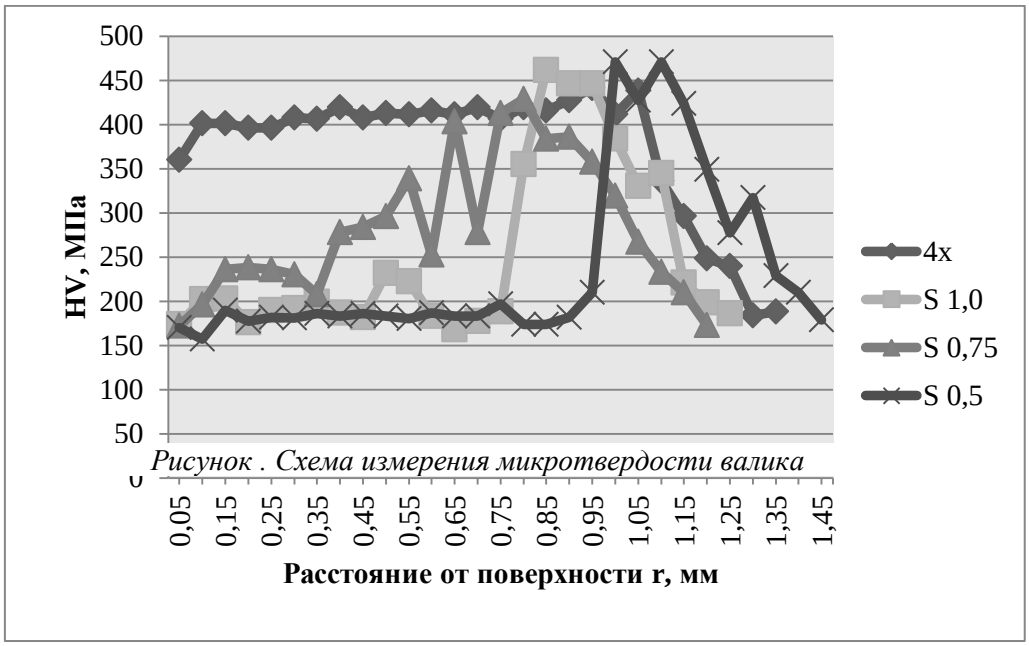


Рисунок . Схема измерения микротвердости валика

Рисунок 18. Микротвердость стали SS 316 L при F = 0 с использованием различных насадок

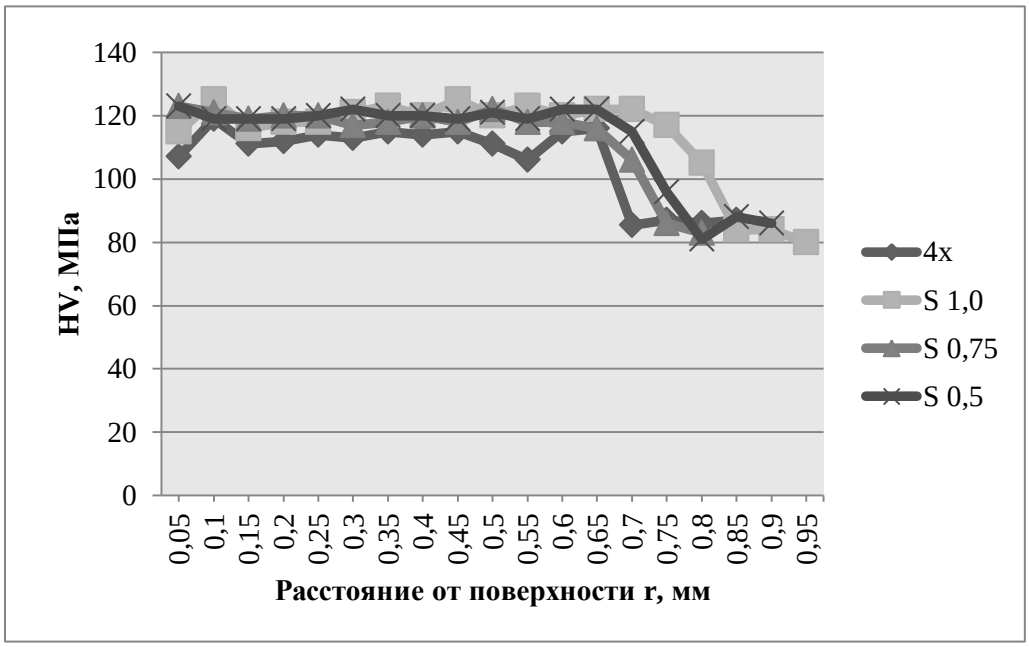


Рисунок 19. Микротвердость алюминиевого сплава Al12Si при F = 0 с использованием различных насадок

4. Выводы

1) Ширина валиков из нержавеющей стали и алюминиевого сплава при использовании различных насадок меняется несущественно.

2) Симметричные валики из нержавеющей стали с минимальным коэффициентом перемешивания были получены при использовании сопла S 0,5 с расположением фокуса газопорошкового потока на поверхности подложки (F=0).

3) Симметричные валики из алюминиевого сплава с минимальным коэффициентом перемешивания были получены при использовании сопла S 1,0 с расположением фокуса газопорошкового потока над поверхностью подложки (F=+3 мм).

Литература

1. Третьяков Р.С. Технологические особенности процесса лазерной модификации поверхностей с коаксиальной подачей порошковых материалов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014.
2. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов/ Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. ; ред. Григорьянц А.Г. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. - 663 с.
3. U. de Oliveira, V. Ocelik, J. Th.M. de Hosson/ Analysis of coaxial laser cladding processing conditions, 2004.

УДК 621.791.725

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ МАТЕРИАЛА НА ЭФФЕКСИТВНОСТЬ ГИБРИДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

Алексей Александрович Быков,
студент 4 курса,
кафедра «Машиностроительные Технологии»
Московский государственный технический университет

Научный руководитель: А.И. Мисюров
кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении»

Ресурсосберегающие технологии предполагают экономию энергии при обработке материалов. Лазерные методы отличаются сравнительно низким КПД, поэтому повышение эффективности лазерного воздействия является в настоящее время актуальной задачей [1]. Известны гибридные способы, позволяющие повысить эффективность лазерного воздействия, в частности за счет синергетического эффекта. Явление синергетического эффекта (Рис. 1) возникает при условии совмещения двух или более источников энергии, в результате чего происходит значительное возрастание эффективности воздействия источников энергии на материал. То есть, если рассматривать этот эффект с позиции математики мы получим довольно неожиданный результат: 1+1=3

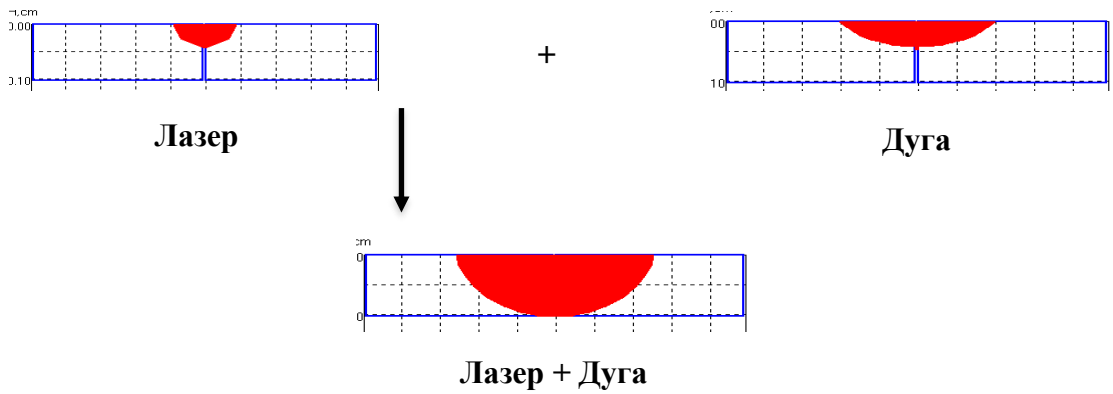


Рис. 1. Синергетический эффект.

Целью данной работы является определение эффективности лазерного воздействия при сварке закаливающихся сталей различных толщин.

Исследования проводились применительно низколегированной стали типа ХН2ГМ. Данные стали используются в сварных конструкциях, где требуется очень высокая прочность. Обычно она используется в качестве конструкционной стали в кранах или в другом крупном промышленном оборудовании, подверженном высоким нагрузкам.

В работе определяли эффективность лазерного воздействия при изменении толщины свариваемых пластин в диапазоне 1,5…4 мм.

В расчетах варьировали следующие показатели:

- Скорость в интервале 1 … 5 см/с
- Расстояние между источниками -1 … 1 см
- Диаметр пятна нагрева доп. источника 0,5 … 1 см
- Толщину пластин 1,5 … 4 см

Эффективность лазерного воздействия оценивали следующим образом [3]:

$$Э = \frac{P_{л.и.}^{max} - P_{л.и.}^{min}}{P_{л.и.}^{max}} \quad \text{, где}$$

$P_{л.и.}^{max}$ - мощность лазерного излучения, необходимая для полного проплавления пластины заданной толщины, при сварке без дополнительного источника тепла;

$P_{л.и.}^{min}$ – минимальная мощность лазерного излучения, необходимая для полного проплавления пластины заданной толщины, при гибридной сварке.

Все расчеты проводились по программе, разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана совместно с СПбГУ, предполагающую использование распределенного источника энергии в качестве дополнительного [2]. Результаты расчета можно отнести к лазерно-дуговой неплавящимся электродом или лазерно-световой сварке.

Ранее [3, 4] было установлено, что эффективность лазерного воздействия зависит от расстояния между лазерным и дополнительным источниками. Так же было установлено, что при увеличении скорости сварки, для того чтобы получить максимальную эффективность, необходимо чтобы дополнительный источник “шел” впереди лазерного и расстояние с увеличением скорости сварки должно возрастать.

Эффективность лазерного воздействия при гибридной сварке закаливающихся сталей снижается с увеличением толщины свариваемых листов. Это справедливо в широком диапазоне скоростей и плотностей мощности дополнительного источника.

На диаграмме (рис. 3) представлены зависимости эффективности от скорости сварки, при сварке разных толщин с диаметром пятна нагрева дополнительного источника 1 см.

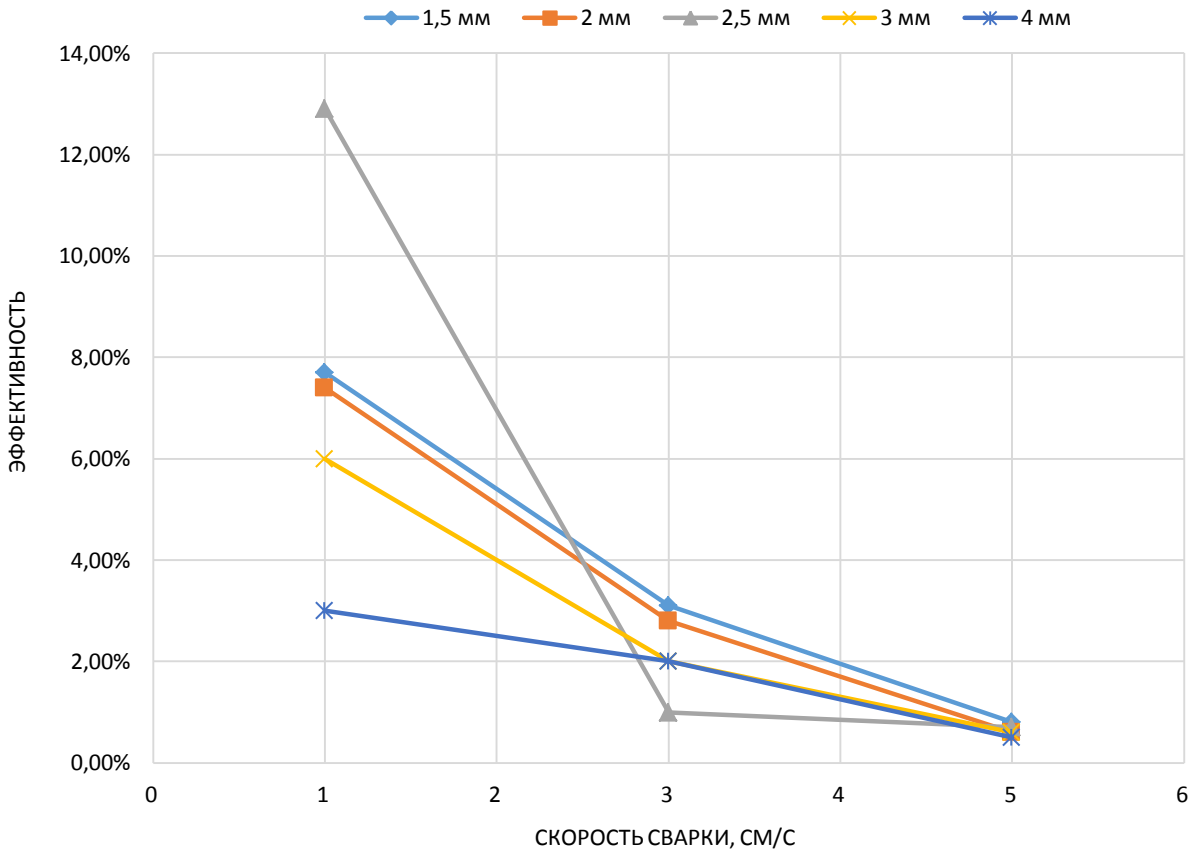


Рис. 2. Зависимость изменения эффективности лазерного воздействия от скорости при различных толщинах материала. Диаметр дополнительного источника 1 см.

В большинстве случаев у всех кривых (рис. 2, 3) просматривается одинаковая тенденция, за исключением кривой отмеченной в легенде знаком звездочка – это мы связываем с несовершенством расчетной модели.

На малых скоростях и при увеличении диаметра дополнительного источника эффективность падает (рис. 2). Так при сварке пластины толщиной 1,5 мм на скорости 1 см/с эффективность лазерного воздействия составила 7,7%, а для толщины 4 мм - 3%, т.е. в случае сварки пластины толщиной 4 мм эффективность снижается в 2,5 раза (или на 4,7%). При сварке на скорости 3 см/с эта разница уменьшается до 1,1%. Для скорости 5 см/с разницу можно считать не существенной, так как она составила всего 0,3%. В данном случае эффективность зависит от толщины пластин.

Уменьшение диаметра пятна нагрева до 0,5 см приводит к уменьшению его распределенности и увеличению плотности мощности. Это оказывает несколько иное влияние на эффективность сварки разных толщин (рис. 3).

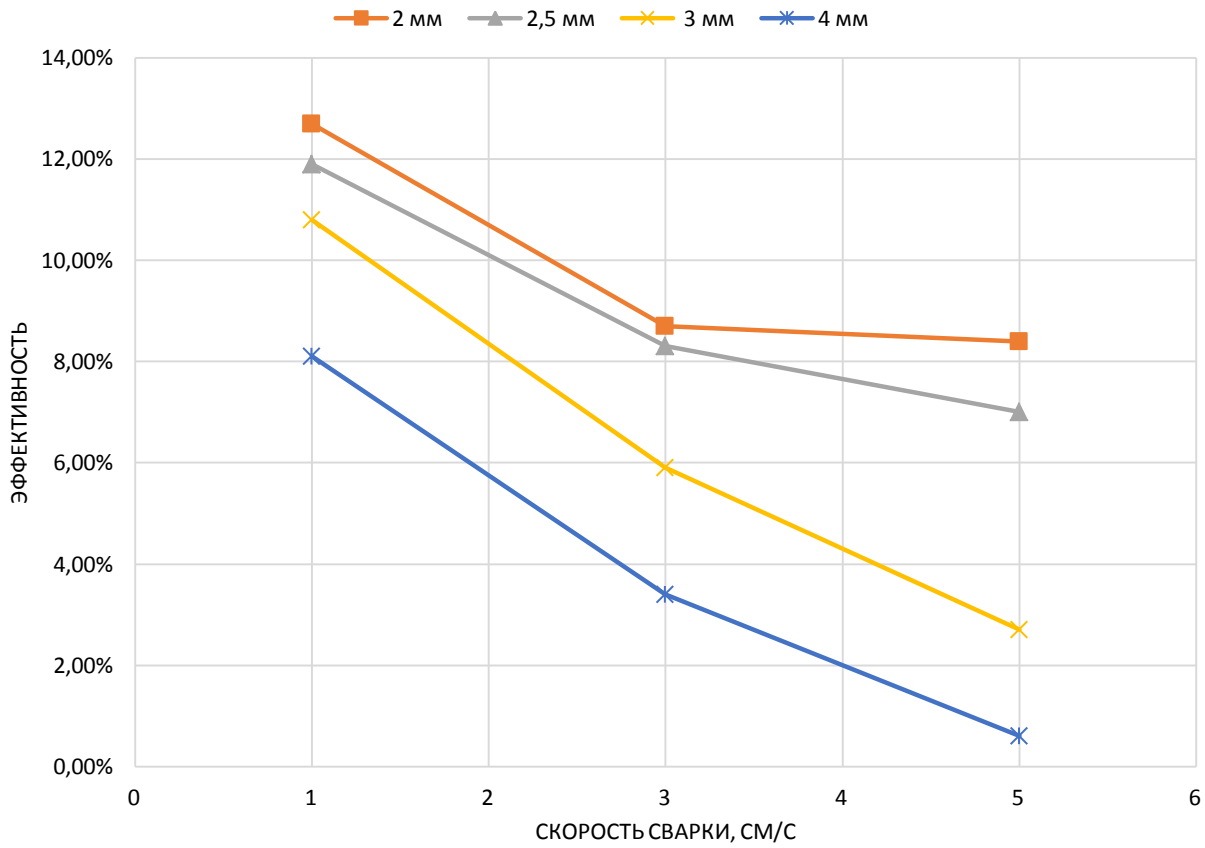


Рис. 3. Зависимость изменения эффективности лазерного воздействия от скорости при различных толщинах материала. Диаметр дополнительного источника нагрева 0,5 см.

На малых скоростях и при малом диаметре дополнительного источника, толщина сварных пластин заметно влияет на конечный результат (рис. 3). Так при сварке пластины толщиной 2 мм на скорости 1 см/с эффективность лазерного воздействия составляет 12,7%, а для толщины 4 мм – 8,1%, т.е. в случае сварки пластины толщиной 4 мм эффективность снижается в 1,5 раза (или на 4,6%). При сварке на скорости 3 см/с эта разница увеличивается до 5,3%, а для скорости 5 см/с разница составляет 7,8%. То есть, как видно из рисунка 3, в случае малого диаметра дополнительного источника энергии, толщина пластин перестает влиять на эффективность.

Далее представлены графики (рис. 4, 5), показывающие как меняется мощность лазерного источника в зависимости от скорости сварки. Толщина материала в обоих случаях равна 1,5 мм.

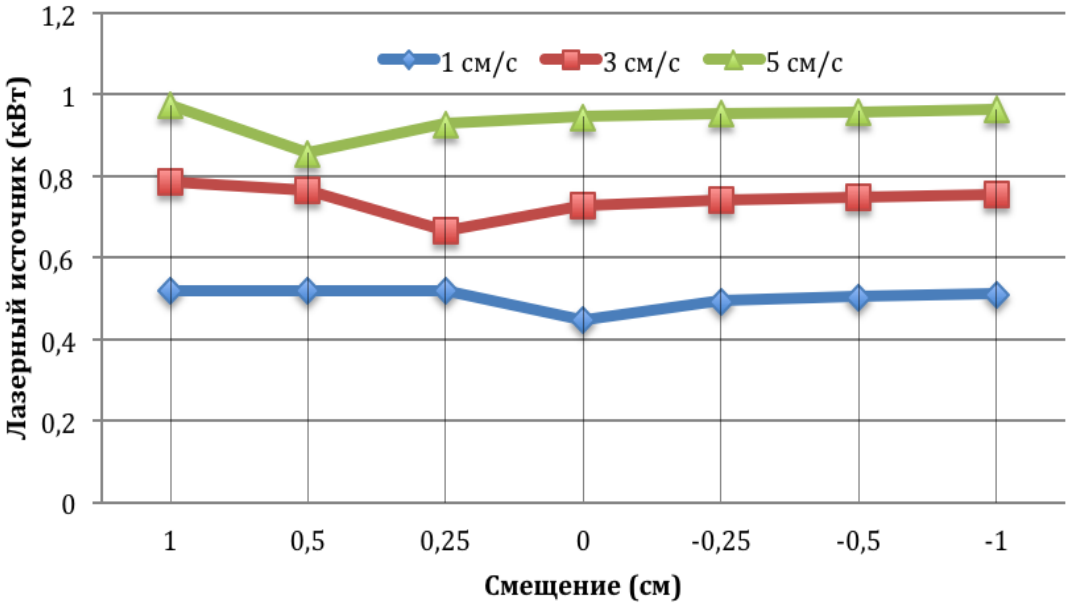


Рис. 4. Зависимость изменения мощности лазерного источника от скорости сварки, при диаметре дополнительного источника 0,5 см.

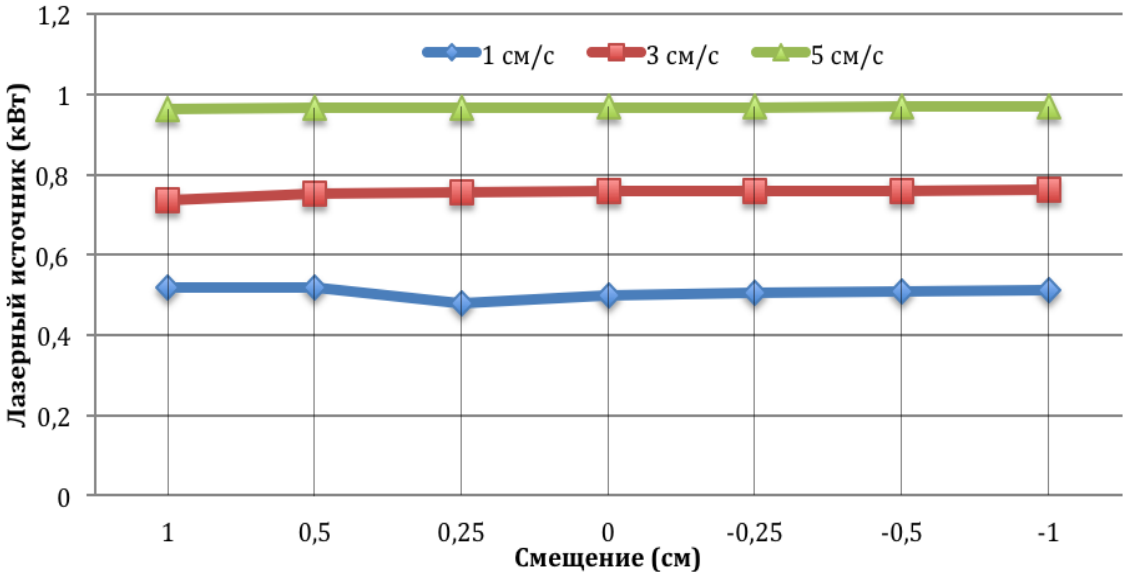


Рис. 5. Зависимость изменения мощности лазерного источника от скорости сварки, при диаметре дополнительного источника 1 см.

Оптимальное взаимоположение дополнительного и основного источников зависит от скорости сварки (рис. 4, 5). Знак минус, в обозначении смещения на графиках, обозначает, что дополнительный источник находится за лазерным.

На малых скоростях (1 см/с) и при малом диаметре (0,5 см) дополнительного источника (рис. 4), нужно совмещать основной и дополнительный источник тепла. Далее, при увеличении скорости до 3 см/с и 5 см/с, расстояния между источниками должно увеличиваться, причем дополнительный источник должен идти перед основным.

Если диаметр пятна дополнительного источника увеличивается до 1 см (рис. 5), то изменение мощности лазерного источника получается не значительным. В данном случае, изменение положения дополнительного источника относительно основного, оказывает малое влияние на эффективность. Значит, эффективность сварки металлов различных толщин зависит от диаметра пятна нагрева дополнительного источника.

Аналогичное поведение графиков наблюдается при толщинах от 1,5 до 4 мм.

Выводы

1. При лазерной гибридной сварке эффективность лазерного воздействия снижается с увеличением толщины свариваемого материала.

2. Увеличение скорости сварки приводит к снижению эффективности для всех исследованных толщин.

3. При большом диаметре пятна дополнительного источника нагрева, с увеличением скорости сварки, толщина пластин перестает оказывать влияние на эффективность.

4. Чем выше плотность мощности дополнительного источника, тем эффективнее протекает процесс сварки исследованных толщин.

5. При малых скоростях и толщинах материала, для повышения эффективности, нужно совмещать основной и дополнительный источник тепла.

6. С увеличением скорости сварки, необходимо отдалять друг от друга источники нагрева, причем дополнительный источник должен обгонять основной. Это справедливо для всех толщин материала.

Литература

1. *А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.М. Чирков*. Гибридные технологии лазерной сварки. Учебное пособие. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2008. – 68с.
2. *Г.М. Алексеев* и др. Перспективы применения светолазерных технологий. Автоматическая сварка, №5, 2005, с. 5-11.
3. *А.И. Мисюров, Хтет Аунг Лин.* Особенности сварки закаливающихся сталей лазерными гибридными источниками теплоты. ISSN 0236-3941. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. 2012 с.78-84
4. *А.И. Мисюров, А.А. Быков. “*Эффективность лазерного воздействия при гибридной сварке”, Издатель "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038. ISSN 2307-0609
5. Молодежный научно-технический вестник # 06, июнь 2013

УДК 621.375.826

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГИБРИДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВРКИ ЗАКАЛИВАЮЩИХСЯ СТАЛЕЙ

Хтет Аунг Лин,
аспирант 2 года,
кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А. И. Мисюров,
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении»

В настоящее время в промышленности находит все более широкое применение лазерная сварка. Высокая концентрация энергии в пятне нагрева обеспечивает высокую производительность и качество изделий.

Дальнейшее развитие лазерная сварка нашла в совмещении тепловых источников. Такие способы получили названия гибридных.

Данными вопросами занимались многие исследователи. Один из первых патентов принадлежит Стину [1]. Эти идеи получены развитов в трудах Японских [2], Немецких [3], российских [4] ученых. На кафедре “Лазерные технологии в машиностроении”, МГТУ им. Н.Э. Баумана подобные работы проводятся с 1988-89г [5].

Несмотря на большое количество работ, посвященных гибридной сварке остаются невыясненными вопросам рациональной области применения этого способа.

Целю работы явилось повышение эффективности лазерного воздействия за счет совмещения источников тепла и установление его технологических особенностей при сварке закаливающихся сталей.

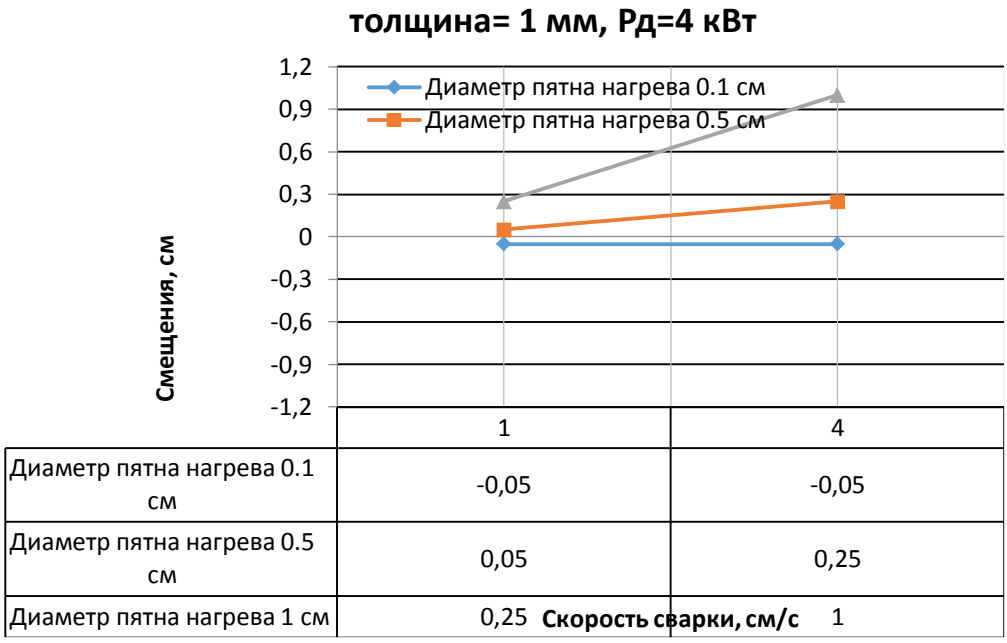
В предыдущих работах [6] нами было показано, что эффективность лазерного воздействия при гибридной сварке зависит от мощности и диаметра пятна нагрева дополнительного источника теплоты, а также расстояния между центрами источников теплоты. Наибольшая эффективность лазерного воздействия достигается при гибридной сварке изделий малых толщин, что справедливо для сталей с различной теплопроводностью. Расстояние между источниками теплоты при гибридной лазерной сварке, на котором эффективность лазерного воздействия максимальна, не соответствует тому, на котором скорость охлаждения минимальна.

В данной работе исследовали влияние параметров гибридной лазерной сварки на эффективность лазерного воздействия. Для этого проводили расчет для сварки закаливающихся сталей с толщиной 1 и 10 мм. Скорость сварки варьировали в диапазоне 1 и 4 см/с. Диаметры дополнительного источника составляли 0,1 0,5 и 1см. Мощность дополнительного источника тепла изменяли в диапазоне 4-8 кВт, а его положение относительно центра лазерного луча в диапазоне -1 до +1см. Знак минус означает, что дополнительный источник тепла находится перед лазерным лучом и плюс означает наоборот. Расчеты проводили по модели, разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана совместно с Санкт-Петербургским государственным техническим университетом [7]. Соблюдали условие полного провара пластины.

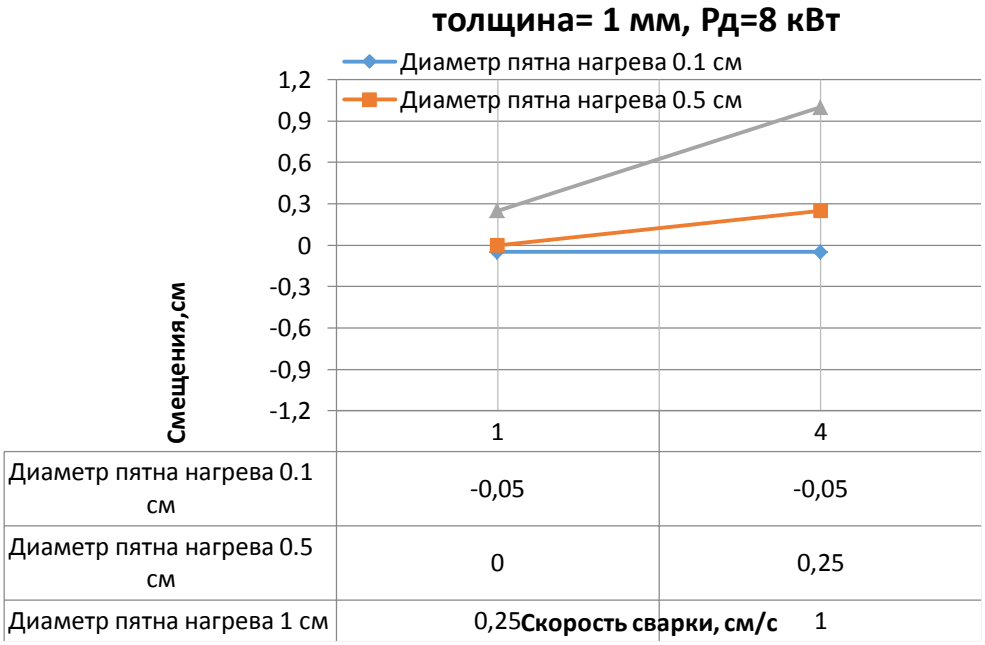
Ранее было показано, что изменение положения центра дополнительного источника тепла относительно центра лазерного луча приводит к уменьшению мощности лазерного излучения, необходимого для полного проплавления. Для разных мощностей дополнительного источника максимальное уменьшение мощности лазерного источника достигается при различных смещениях. Эффективность лазерного воздействия зависит от расстояния между центрами тепловых источников.

Оптимальное взаимное положение основного и дополнительного источника, при котором наблюдается максимальная эффективность зависит от скорости сварки, диаметра пятна нагрева, мощности дополнительного источника.

Анализ полученных расчетных данных показывает, что при сварке малых толщин в широком диапазоне мощностей дополнительного источника с увеличением скорости сварки (рис 1) для сохранения высокой эффективности необходимо увеличивать расстояние между источниками.



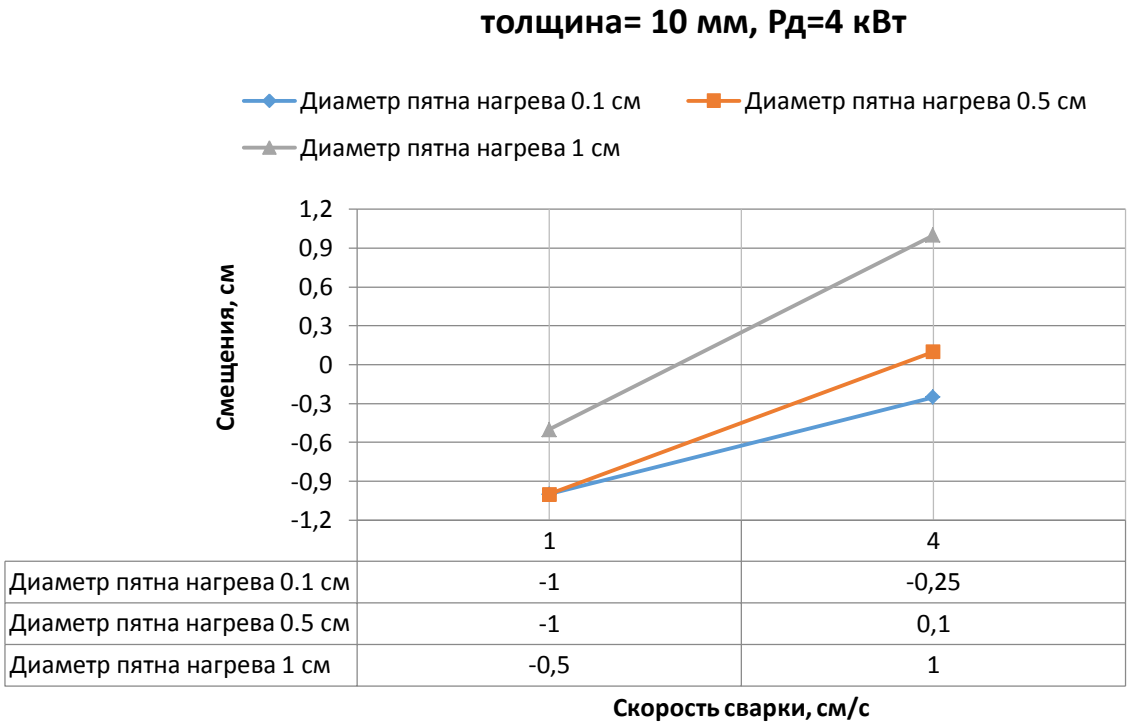
(а)



(б)

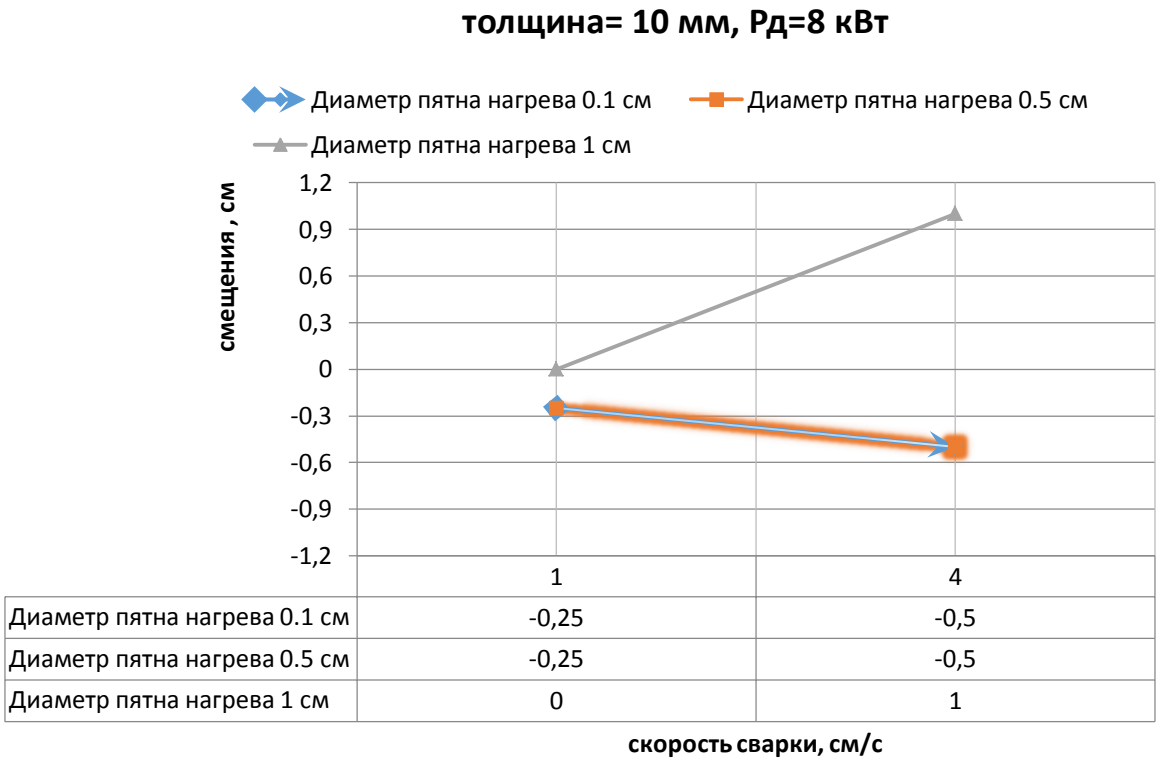
Рис 1. Зависимость рассогласования от скорости сварки при малой мощности дополнительного источника (а), при большой мощности дополнительного источника (б).

Для большей толщины эта зависимость получается иной. С увеличением скорости сварки при малой мощности дополнительного источника, необходимо увеличивать расстояние между источниками (рис 2 а), а при его большой мощности (рис 2 б) уменьшать.



	1	4
Диаметр пятна нагрева 0.1 см	-1	-0,25
Диаметр пятна нагрева 0.5 см	-1	0,1
Диаметр пятна нагрева 1 см	-0,5	1

(а)



	1	4
Диаметр пятна нагрева 0.1 см	-0,25	-0,5
Диаметр пятна нагрева 0.5 см	-0,25	-0,5
Диаметр пятна нагрева 1 см	0	1

(б)

Рис 2. Зависимость рассогласования от скорости сварки при большой толщине при малой мощности дополнительного источника (а), при большой мощности дополнительного источника (б).

Эффективность лазерного воздействия оценивали по формуле:

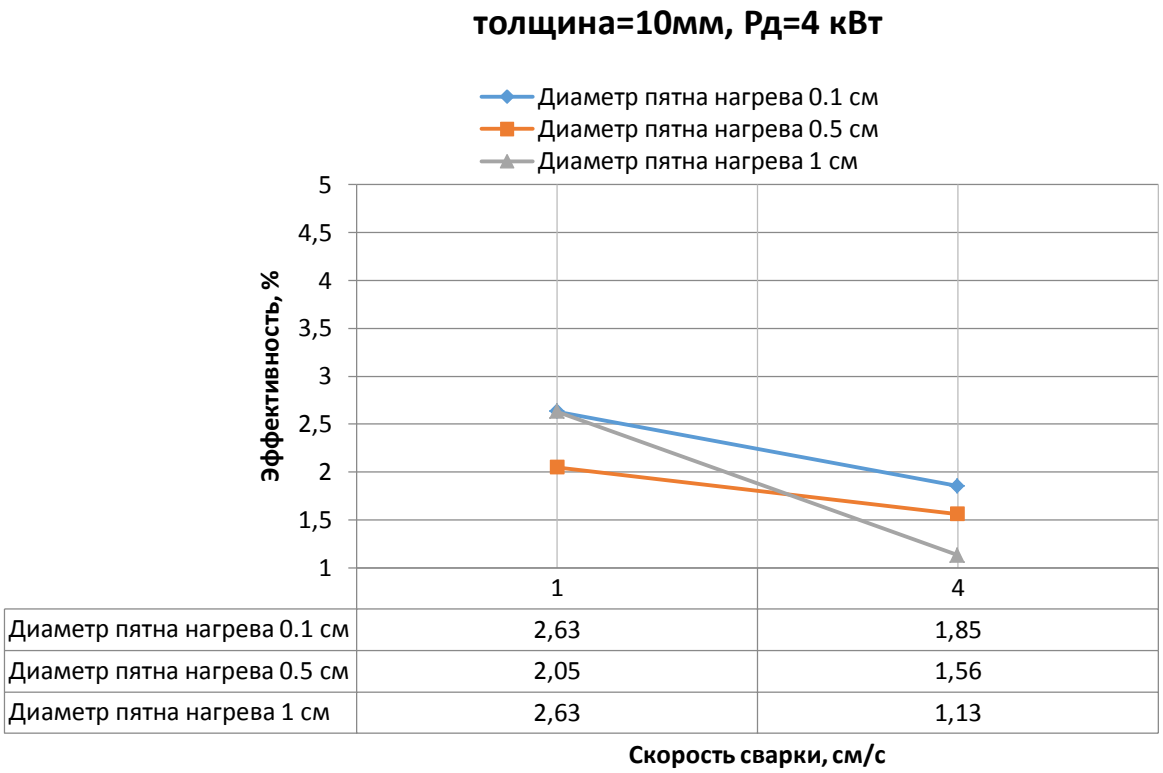
$Э = [P_{л.и\ (max)} - P_{л.и\ (min)}] / P_{л.и\ (max)}$

где $P_{л.и\ (max)}$ - мощность лазерного излучения, необходимая для полного проплавления пластины заданной толщины, при сварке без дополнительного источника тепла;

$P_{л.и\ (min)}$ – минимальная мощность лазерного излучения, необходимая для полного проплавления пластины заданной толщины, при гибридной сварке.

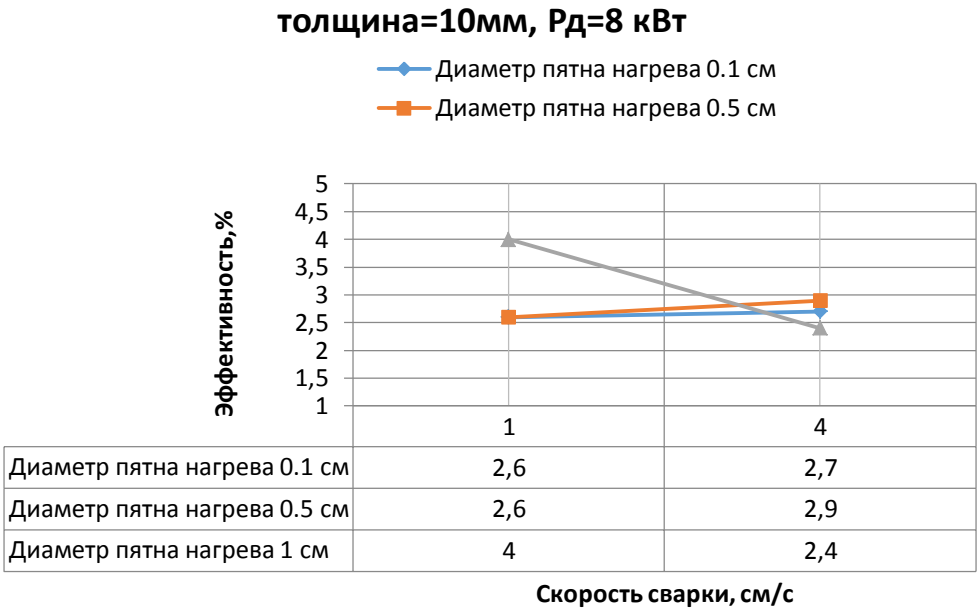
Оценка эффективности показала, что для большей толщины увеличение скорости сварки, при малой мощности дополнительного источника приводит к снижению эффективности (рис 3 а). При большой мощности дополнительного источника (рис 3 б), эффективность несколько повышается, однако при большом диаметре дополнительного источника отмечено ее снижение.

Анализ влияние диаметра пятна нагрева показал, что при сварке тонких пластин его увеличение требует увеличение расстояния между лазерным и дополнительным источником тепла (рис 4). Это справедливо в широком диапазоне мощности дополнительного источника.



	1	4
Диаметр пятна нагрева 0.1 см	2,63	1,85
Диаметр пятна нагрева 0.5 см	2,05	1,56
Диаметр пятна нагрева 1 см	2,63	1,13

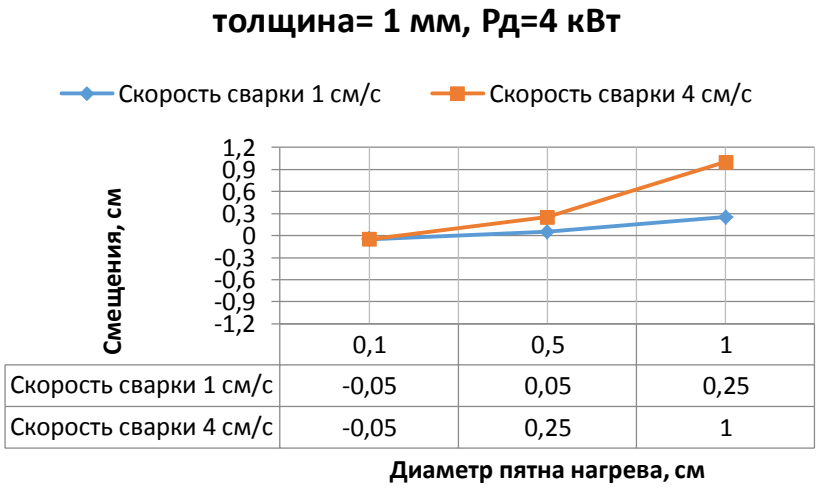
(а)



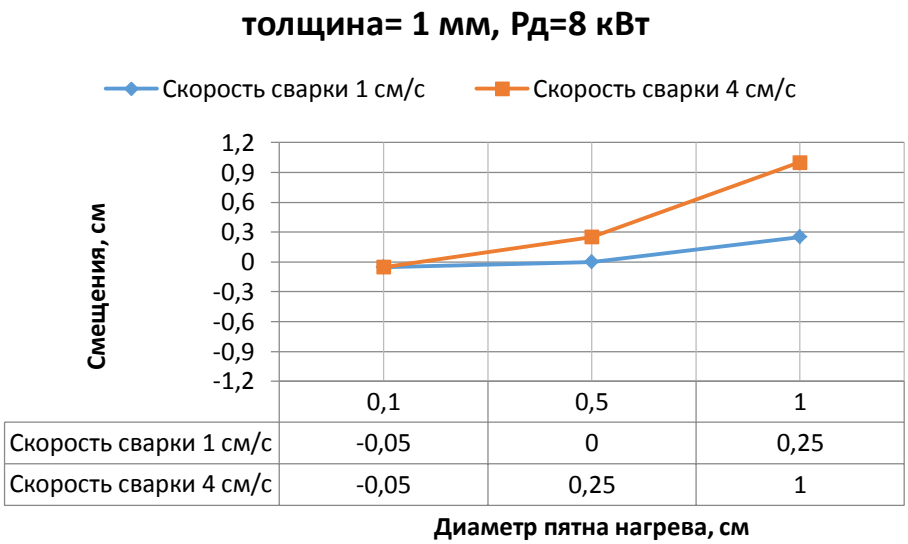
(б)

Рис 3. Зависимость эффективности лазерного воздействия от скорости сварки при большой толщине для мощности дополнительного источника 4 кВт (а) и 8 кВт (б).

В случае сварки листов больших толщин с увеличением диаметр пятна нагрева, при малой мощности дополнительного источника (рис 5 а), необходимо увеличивать расстояние между источниками, а при большой мощности наряду с этим менять его положение по отношению к лазерному лучу (рис 5 б).

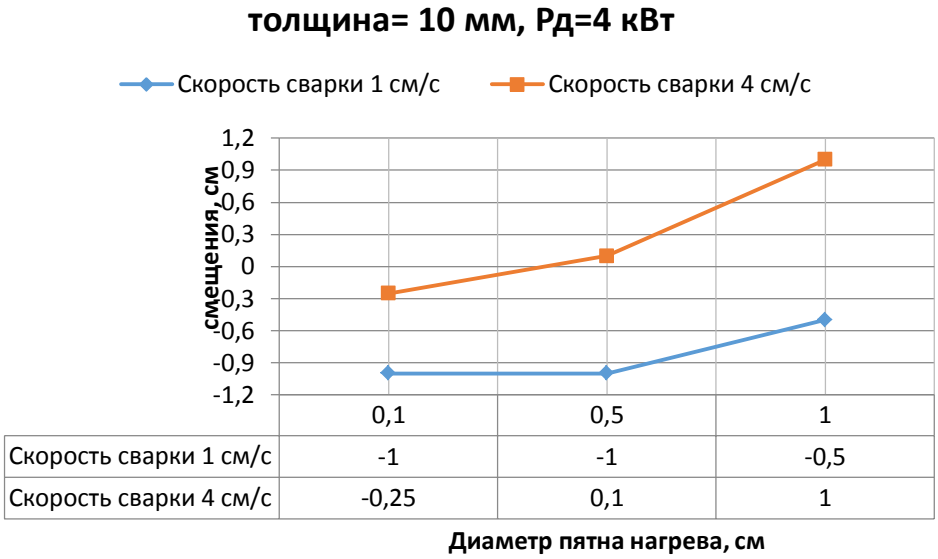


(а)

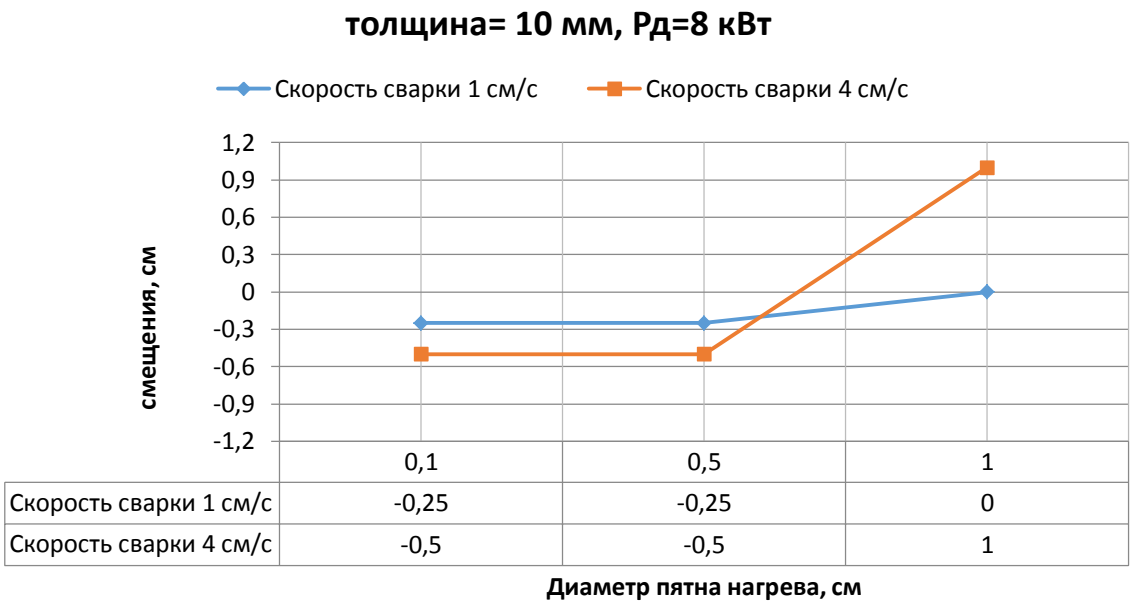


(б)

Рис 4. Зависимость рассогласования от диаметра пятна нагрева при малой мощности дополнительного источника (а), при большой мощности дополнительного источника (б).



(а)



(б)

Рис 5. Зависимость рассогласования от диаметра пятна нагрева при малой мощности дополнительного источника (а), при большой мощности дополнительного источника (б). Полученные результаты могут служить руководством для выбора оптимальных параметров гибридной сварки с наиболее эффективным использованием лазерного излучения.

Конечные свойства сварного соединения зависят от его структуры, на формирование которой определяющее влияние оказывают параметры сварочного термического цикла, характеризуемые скоростью охлаждения или временем пребывания металла при температурах наименьшей устойчивости аустенита. В условиях неравновесного термического цикла сварки металл сварного соединения претерпевает полную или частичную закалку, образуются преимущественно закалочные структуры, отличающиеся высокой вероятностью появления хрупких разрушений в шве или зоне термического влияния.

Для оценки вероятности появления закалочных структур в сварном шве производили расчет времени и скорости охлаждения в интервале температур 800-500^{0}С (рис 6). Чем больше это время, тем меньше скорость охлаждения, тем ниже вероятность появления закалочных структур. Скорость охлаждения зависит от взаимного положения тепловых источников. На режимах гибридной лазерной сварки, при которых наблюдается максимальная эффективность лазерного излучения с точки зрения проплавляющей способности, скорость охлаждения максимальна [8]. Дальнейшие исследования позволили обнаружить изменение размеров сварочной ванны (рис 7). Например, при расстоянии между тепловыми источниками L = 1см хвостовая часть сварочной ванны удлиняется. Увеличение объема жидкого металла способствует, по видимому, увеличению времени пребывания при температурах 800 – 500^{0}С. Анализ полученных результатов показал, что гибридную сварку закаливающихся сталей нецелесообразно проводить на режимах при которых достигается максимальная эффективность лазерного воздействия.

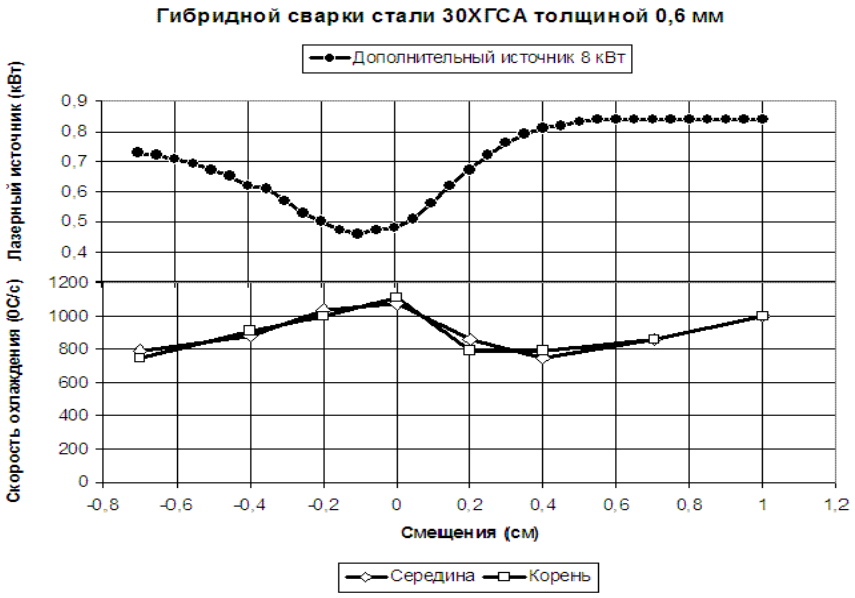


Рис 6. Сопоставление мощности лазерного излучения, необходимой для полного проплавления, и скорости охлаждения металла шва при различных взаимных положениях тепловых источников. Мощность дополнительного источника 8 кВт.

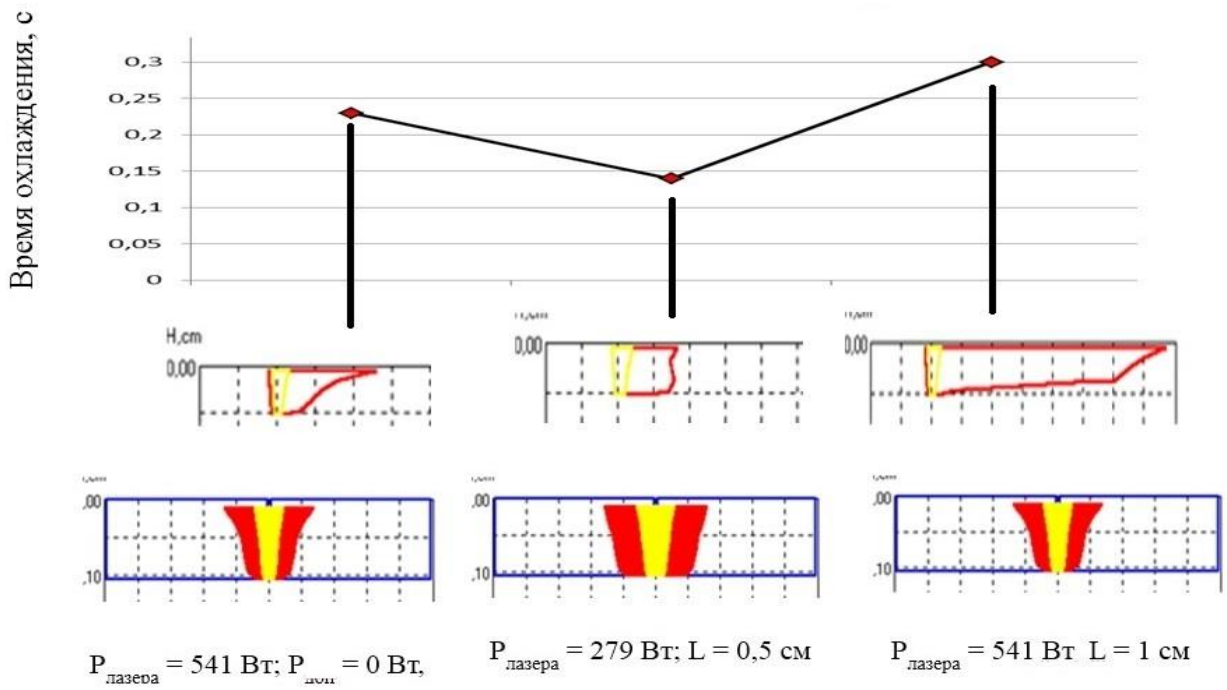
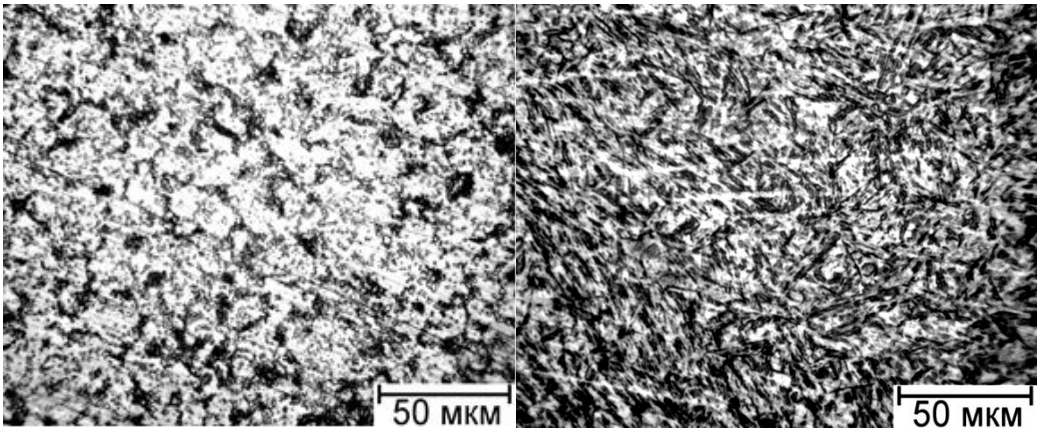


Рис 7. Время охлаждения и форма сварочной ванны в зависимости от положения дополнительного источника тепла. Сталь типа 30ХГСА; толщина 1мм; $V_{св.}$ = 3,3 см/с; $P_{доп}$ = 5000 Вт, d = 0,5 см

Экспериментальные исследования подтвердили возможность управления структурой сварного соединения. В частности при гибридной сварке стали типа 30ХГСА, регулируя взаимное положение источников тепла, можно получить гамму структур от мартенсито-бейнитной до троосто-бейнитной. Оценку фазового состава и количества структурных составляющих производили по результатам измерения микротвердости по методике, предложенной Майоровым Л.Н.

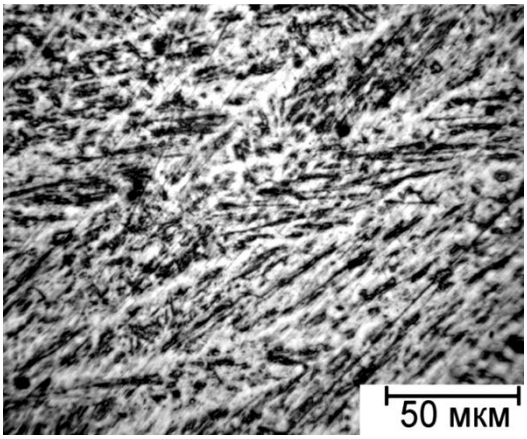
В исходном состоянии металл имеет перлитную структуру (рис 8 а). После лазерной сварки, процентное содержание структурных составляющих в металле сварного шва составило мартенсит – около 95%, бейнит – 5%. (рис 8 б)

При гибридной лазерной сварке происходит снижение скорости охлаждения и структура шва состоит из троосто-бейнита. Расчетная оценка с учетом плотности вероятности распределения микротвердости показала, что литой металл шва состоит из бейнита (примерно 88%) и троостита (12%) (рис 8 в). Образование в структуре шва троосто-бейнита должно привести к повышению пластических свойств.



а) б)

а) В исходном состоянии перлит – 100%; б) После лазерной сварки Мартенсит 95%, Бейнит 5%.



(в)

После гибридной лазерной сварки Бейнит 88%, Троостит 12%

Рис 8. Структура металла в исходном состоянии (а), после лазерной сварки (б) и после гибридной лазерной сварки (в).

Выводы

1. Расчетная оценка показала, что наибольшая эффективность лазерного воздействия при сварке сталей различных толщин достигается при определенном соотношении скорости, диаметра пятна дополнительного нагрева, расстояния между источниками, о также их взаимного положения. Полученные данные могут служить руководством для выбора оптимальных режимов.
2. Экспериментально показано, что использование гибридной лазерной сварки для закаливающихся сталей позволяет по сравнению с лазерной получить более пластичные структурные составляющие в сварном шве.

Литература

1. M.W. Steen. Pat. N 4167662, USA, 1978. B23K9/00. Methods and apparatus for cutting and welding.

2. Хамадааки М., Акихиро У. Эффективность сочетания лазера со сваркой плавящимся электродом в инертном газе: Пер. с японского/ВЦП. – 1986. – Л- 46463. – с. 8 (Пер. статьи из журнала: Ое Кикай Кочаку. – 1984. - №3 – с 100-104).
3. Staufer H., Hackl H. Laser-hybrid welding - a powerful joining technology, Proceedings of the 7th Int. Aachener Sweiβtechnik Kolloq., Germany, Aachen, 2001, Vol. 1.
4. Кривцун И. В. Особенности проплавления металла при лазерно-дуговой сварке, Автоматическая сварка, 2001, № 12
5. А.Г. Григорьянц, О.Б. Бибик, В.С. Майоров, Л.А.Резник, И.Н. Шиганов. Заявка № 4815248/27 СССР, 1989. МКИ В 23 К 26/00, Головка для лазерно-дуговой сварки.
6. А.И. Мисюров, Н.А. Смирнова, Хтет Аунг Лин. Лазерная гибридная сварка тонколистовых закаливающихся сталей. BEAM TECHNOLOGIES & LASER APPLICATION Proceedings of the VII International scientific and technical Conference, 18 – 21, September 2012, Saint-Petersburg, Russia, Edited by Prof. G. Turichin, Saint-Petersburg Publishing house SPbSPU, 2013, С. 247-253.
7. Алексеев Г.М, Туричин Г.А, Мисюров А.И. и др. Перспективы применения светолазерных технологий. Автоматическая сварка, №5, 2005, С. 5-11.
8. А.И. Мисюров, Хтет Аунг Лин. Особенности Сварки Закаливающихся Сталей Лазерными Источниками Теплоты. ISSN 0236-3941, Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Сер. “Машиностроение”,2012, С. 78-84.

УДК 53.083

ОБЗОР МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИН ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАНОПЛЕНОК

Людмила Михайловна Ремез,
студентка 5 курса,
кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.Е. Шупенев
аспирант 1 года
кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Бурное развитие в последние пару десятков лет получили тонкопленочные технологии. На данный момент существует множество перспективных направлений, например: нанолитография, упрочняющие покрытия, алмазоподобные покрытия, термоэлектричество[1]. В каждом из этих направлений при создании покрытия необходимо очень точно отслеживать толщину (иногда даже до атомарного уровня) для сохранения требуемых свойств. Например, для упрочняющих покрытий небольшое изменение толщины может привести к значительному ухудшению прочности.

В частности, исследования в области термоэлектричества показали широкие перспективы по использованию тонкопленочных гетероструктур. На сегодняшний день наиболее широко используемыми материалами в данной области ввиду оптимального соотношения теплофизических качеств являются теллуриды: теллуриды висмута и теллуриды свинца. Особенностью их использования является квантово-размерное взаимодействие наноструктурированного материала на электрон-фононные потоки, приводящее к увеличению термоэлектрической добротности и как следствие КПД преобразования энергии. Для достаточного проявления квантово-размерных эффектов необходимо создание качественных тонких структур, контролируемых с точностью до атомных величин[2].

При поиске подходящих методов измерения основными критериями являются:
- точность получаемых результатов
- требуемая квалификация персонала
- сохранение / разрушение образца в процессе измерений
- универсальность метода в плане возможности проведения других измерений
- ограничения к образцу по геометрии и материалу.

Также следует учитывать стоимость оборудования и оперативность измерений.

Эллипсометрия — метод исследования свойств вещества на границе (поверхности) раздела различных сред по состоянию поляризации отраженного или преломленного света.

Падающий на поверхность плоско поляризованный свет приобретает при отражении и преломлении эллиптическую поляризацию вследствие наличия тонкого переходного слоя на границе раздела сред, и оптические постоянные этого слоя определяют параметры эллиптической поляризации.

Основная область применения эллипсометрии — определение оптических постоянных тонких (например, оксидных) пленок, а также их толщин в диапазоне, существенно меньшем длины волны света.

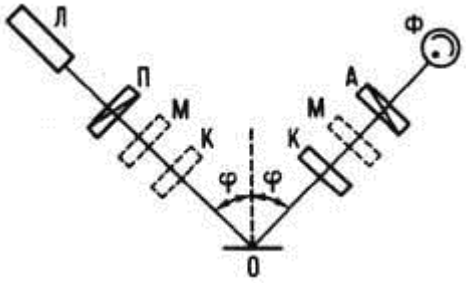


Рис. 1. Принципиальная схема эллипсометра:
Л – лазер; Ф - фотоэлектрический приёмник света; П - поляризатор; А - анализатор;
К - компенсатор; М - модулятор света.

Достоинствами эллипсометрии являются простота и быстрота измерений (имеются автоматические эллипсометры), возможность производить их в ходе процесса, в вакууме, при высоких температурах, в агрессивных средах; кроме того, при экспериментах поверхности не загрязняются и не разрушаются. Главный недостаток метода — трудность правильного выбора модели отражающей системы и интерпретации результатов измерений.

Метод эллипсометрии основан на эффекте изменения формы поляризации света при отражении от поверхности раздела двух сред и заключается в облучении исследуемой поверхности поляризованным светом и измерении изменений эллипса поляризации луча света в результате отражения от поверхности. Суть метода эллипсометрии заключается в анализе изменений характеристик светового пучка в результате взаимодействия с исследуемой поверхностью. По этим изменениям определяют отражательные свойства поверхности, которые однозначно зависят от коэффициента преломления вещества, от наличия отражающих центров в приповерхностном слое или наличия второй плоскости отражения, то есть прозрачной пленки на поверхности. Поляризация света при отражении от внешней и внутренней поверхностей тонкой пленки на подложке зависит от коэффициента преломления и от толщины пленки в пределах от единиц микрон до долей моноатомного слоя.

Данный метод удобен при использовании материалов с известными оптическими постоянными, в частности, к простым веществам. Измерения термоэлектрических пленок, полученных методом PLD возможны с помощью эллипсометрии, но нецелесообразны ввиду необходимости проведения большого количества предварительных измерений оптических параметров из-за варьирования осаждаемой стехиометрии.

Рентгеноструктýрный анáлиз (рентгенодифракционный анализ) — один из дифракционных методов исследования структуры вещества. В основе данного метода лежит явление дифракции рентгеновских лучей на трехмерной кристаллической решётке. Метод позволяет определять атомную структуру вещества, включающую в себя пространственную группу элементарной ячейки, её размеры и форму, а также определить группу симметрии кристалла.

Рентгеноструктурный анализ является распространенным методом определения структуры вещества в силу его простоты и относительной дешевизны.

Метод основан на использовании рентгеновского дифрактометра — прибора для одновременной регистрации интенсивности и направления дифрагированных лучей. Рентгеновский дифрактометр состоит из источника рентгеновского излучения, рентгеновского гониометра, в который помещают исследуемый образец, детектора излучения и электронного измерительно-регистрирующего устройства. Детектором излучения служит счётчик квантов. На счётчик выводится последовательно каждый дифракционный луч, что достигается перемещением счётчика в процессе измерения. Рентгеновский дифрактометр позволяет измерять интенсивности дифрагированного в заданном направлении рентгеновского излучения и углы дифракции.

Дифрактометр позволяет проводить исследования тонких пленок и многослойных структур. За счет разнообразия методик проведения измерений и методов обработки можно решить сразу несколько задач:

- Толщина
- Шероховатость
- Плотность
- Однородность поверхности

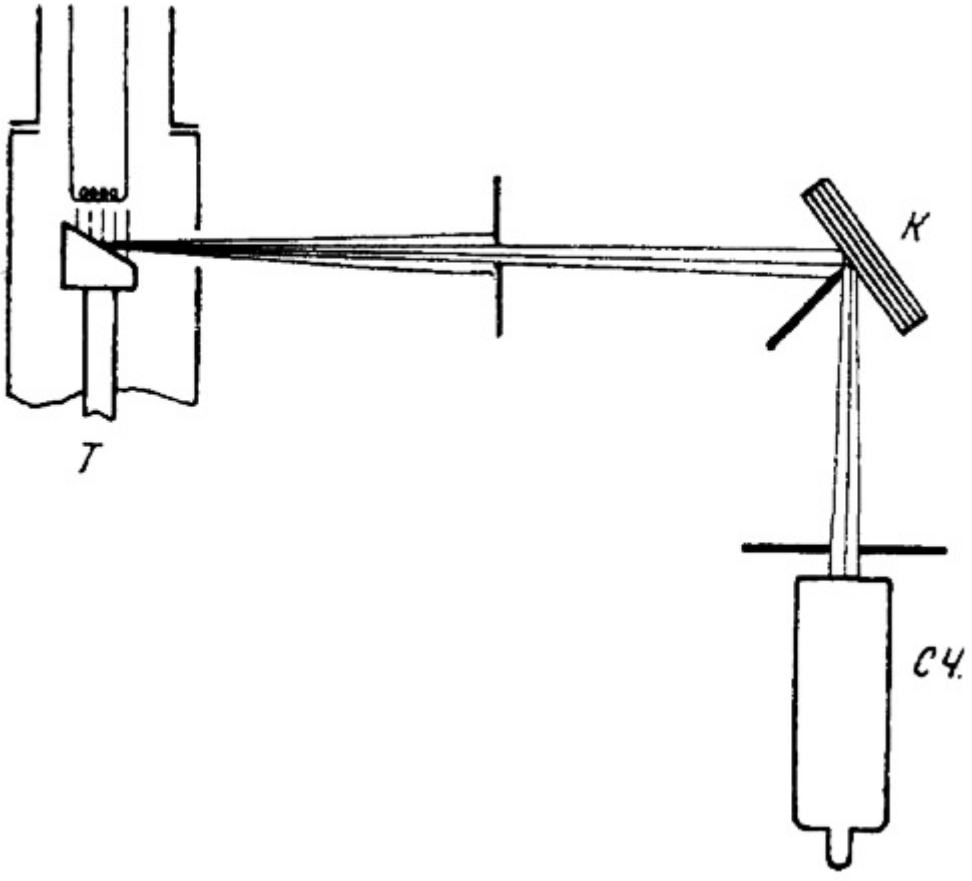


Рис. 2. Схема рентгеновского спектрографа: Т – разборная рентгеновская трубка, К – кристалл, СЧ - счетчик Гейгер-Мюллера.

Спектроскопия обратного Резерфордовского рассеяния (РОР)

Спектроскопия резерфордовского обратного рассеяния, как и спектроскопия ионного рассеяния, позволяет получать информацию о химическом составе и кристалличности образца как функции расстояния от поверхности образца (глубины), а также о структуре поверхности монокристаллического образца. Основной особенностью метода является использование высокоэнергетических ионов, проникающих глубоко внутрь твердого тела и рассеивающихся обратно от глубоко лежащего атома. Энергия, потерянная ионом в этом процессе, представляет собой сумму двух вкладов. Во-первых, это непрерывные потери энергии при движении иона вперед и назад в объеме твердого тела (так называемые потери на торможение). Скорость потери энергии на торможение (stopping power, dE/dx для большинства материалов хорошо известна, что позволяет перейти от шкалы энергий к шкале глубин. Во-вторых, это разовая потеря энергии в акте рассеяния, величина которой определяется массой рассеивающего атома. В качестве примера на рис.3 приведена схема формирования спектра от образца, представляющего собой тонкую пленку на подложке. Пленка толщиной d проявляет себя на спектре в виде плато шириной ΔE. Правый край плато соответствует ионам, упруго рассеянным от поверхности, левый край — ионам, рассеянным от атомов пленки на границе раздела пленка–подложка. Рассеяние от атомов подложки на границе раздела соответствует правому краю сигнала подложки.

Для исследования структуры монокристаллических образцов с помощью спектроскопии резерфордовского обратного рассеяния используется эффект каналирования. Эффект заключается в том, что при ориентации пучка ионов вдоль основных направлений симметрии монокристаллов те ионы, которые избежали прямого столкновения с атомами поверхности, могут проникать глубоко в кристалл на глубину до сотен нм, двигаясь по каналам, образованным рядами атомов. Сравнивая спектры, полученные при ориентации пучка ионов вдоль направлений каналирования и вдоль направлений, отличных от них, можно получить информацию о кристаллическом совершенстве исследуемого образца. Из анализа величины так называемого поверхностного пика, являющегося следствием прямого столкновения ионов с атомами поверхности, можно получить информацию о структуре поверхности, например, о наличии на ней реконструкций, релаксаций и адсорбатов

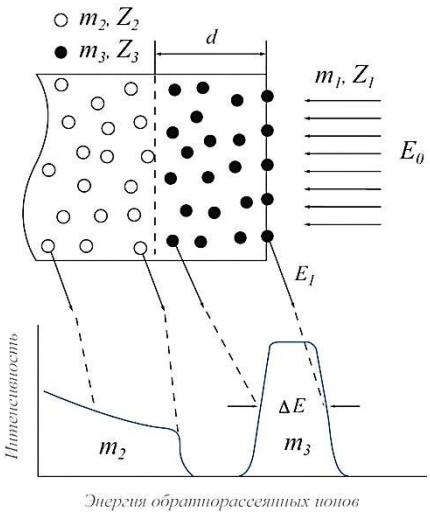


Рис. 3.Схематическая диаграмма спектра ионов с массой m_1 и первичной энергией E_0, рассеянных от образца, состоящего из подложки из атомов с массой m_2 и пленки из атомов с массой m_3 толщиной d.

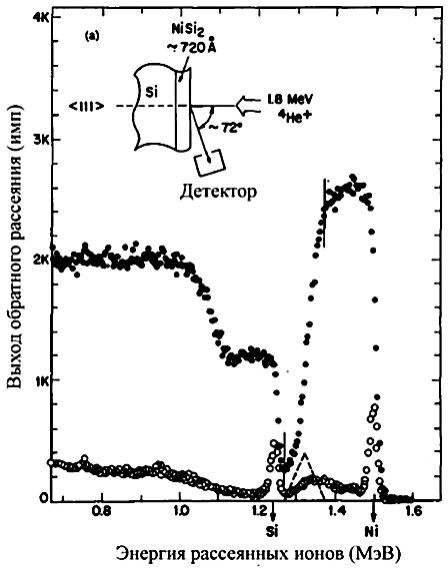


Рис. 4. Спектры РОР. На врезке показана геометрия рассеяния. Вертикальные линии показывают энергетическую ширину интерфейса. На спектре каналирования отчетливо видны два пика поверхностного рассеяния.

В целом, характеризуя метод обратного Резерфордовского рассеяния, можно указать, что он наиболее эффективен при изучении пленок, содержащих тяжелые атомы, которые нанесены на подложки, состоящие из атомов с малым атомным номером. Таким образом, РОР измерения могут быть крайне информативными при изучении пленочных покрытий на таких подложках как MgO, LiBO3, Al2O3, SiO2, Si, C и т.д. При исследовании распределения легких элементов, нанесенных или внедренных в подложку с большим атомным номером (Ge, GaAs и др.), необходимо использовать нерезерфордовское рассеяние в специально подобранных условиях или ориентироваться на применение ядерных реакций.

Растровая электронная микроскопия

Использование растровой развертки электронного луча по поверхности образца является одним из способов автоматизации измерений. По своим возможностям РЭМ является продолжением оптической микроскопии, расширяющей ее возможности в исследовании топологии поверхностей кристаллических материалов. Разрешение наиболее распространенных РЭМ достигает 5-10 нм при недостижимой для других видов микроскопов глубине резкости 0,6-0,8 мм, причем при изучении топологии поверхности вполне достаточно использование низковольтных РЭМ с диаметром пучка электронов 10 мкм. Обычно используют пучок электронов с энергией 10-30 кэВ, хотя в отдельных случаях могут использоваться электроны с энергией в несколько сотен эВ. В РЭМ изображение объекта формируется последовательно по точкам и является результатом взаимодействия электронного пучка (зонда) с поверхность образца. Каждая точка образца последовательно облучается сфокусированным электронным пучком, который перемещается по исследуемой поверхности подобно сканированию электронного луча в телевизионных системах. При взаимодействии электронов зонда с веществом возникают ответные сигналы различной физической природы (отраженные и вторичные электроны, Оже-электроны, рентгеновское излучение, свет, поглощенный ток и пр.), которые используются для синхронного построения изображения на экране монитора. Для формирования изображения не используется электронно-оптическая система, изменение масштабов изображения осуществляется радиотехническими средствами. Поэтому растровые электронные микроскопы принципиально отличаются от микроскопов, как дифракционных приборов, в обычном понимании этого термина. По существу РЭМ — это телевизионный микроскоп.

Одним из существенных достоинств РЭМ является возможность в целом ряде случаев проводить исследования образцов практически без предварительной подготовки поверхности. Толщина образцов для РЭМ не имеет определяющего значения. Образцы могут иметь размеры порядка нескольких десятков мм, и ограничиваются только конструктивными возможностями держателя. Область применения методов РЭМ чрезвычайно широка – исследование топографии поверхности, приповерхностных структурных дефектов, электрически активных дефектов, электрических и магнитных доменов, определение атомного состава поверхности.

Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ, частный случай РЭМ) является наиболее универсальным классическим методом исследования структурных дефектов кристаллов, используется непосредственно для анализа морфологических особенностей, ориентации дефектов относительно решетки матрицы, определения их размеров. Для работы на просвечивающих электронных микроскопах требуются специально приготовленные тонкие препараты – реплики или фольги, прозрачные для электронов. Наиболее распространены электронные микроскопы с ускоряющим напряжением 100 и 200, 300 и 400 кВ, при этом исследуемые образцы должны иметь различную толщину в зависимости от величины ускоряющего напряжения (для 100 кВ в случае кремния оптимальная толщина 0,3-0,4 мкм, для 200 кВ - от 0,6-0,8мкм до 1мкм). Реплики используются для наблюдения микрорельефа, фактуры поверхности

исследуемого образца. Сама реплика – это тонкая пленка какого-то вещества, на которой получают отпечаток микрорельефа поверхности. Это осуществляется, например, путем напыления угольной пленки или нанесения пленки лака или желатина. Метод реплик позволяет получать информацию о структуре поверхности образцов. Фольги – тонкие пленки, которые получают из массивных образцов, причем утонение образца необходимо вести таким образом, чтобы не внести в исследуемую область дополнительных нарушений. Утоненный образец, как и снятую реплику, помещают на специальную сетку с крупными отверстиями и размещают в колонне микроскопа. Именно на фольгах ведутся исследования дефектообразования в кристаллах.

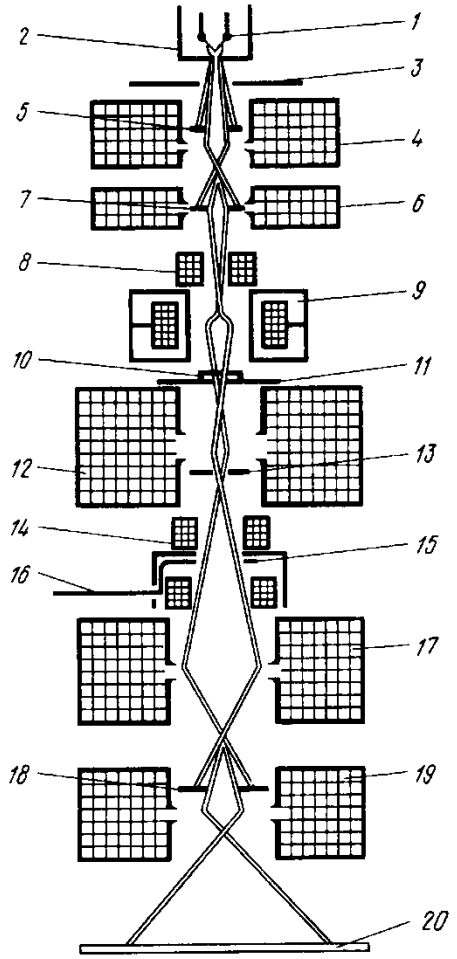


Рис. 5. Принципиальная схема просвечивающего электронного микроскопа:
1-катод, 2- фокусирующий электрод, 3- анод, 4- первый конденсор, 5- диафрагма первого конденсора, 6- второй конденсор, 7- диафрагма второго конденсора, 8- стигматор второго конденсора, 9- корректор юстировки, 10- объект исследования, 11- столик для объектов, 12- объективная линза, 13- апертурная диафрагма, 14- стигматор объективной линзы, 15- секторная диафрагма, 16- стигматор промежуточной линзы, 17- промежуточная линза, 18- диафрагма поля зрения, 19 проекционная линза, 20- экран для наблюдения.

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) — один из методов зондовой сканирующей микроскопии, применяемый для исследования локальных свойств поверхности, в котором анализируют силу взаимодействия иглы кантилевера (зонда) с поверхностью исследуемого образца в процессе сканирования.

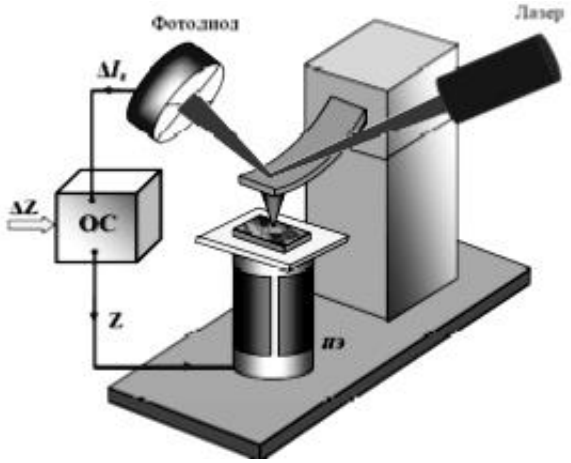


Рис. 6. Схематичное изображение процесса атомно-силовой микроскопии

В основе работы АСМ лежит силовое взаимодействие между зондом и поверхностью, для регистрации которого используются специальные зондовые датчики, представляющие собой упругую консоль с острым зондом на конце. Сила, действующая

на зонд со стороны поверхности, приводит к изгибу консоли. Регистрируя величину изгиба, можно контролировать силу взаимодействия зонда с поверхностью.

В зависимости от характера действия силы между кантилевером и поверхностью образца выделяют три режима работы атомно-силового микроскопа:

1. Контактный (англ. *contact mode*)
2. «Полуконтактный» (англ. *semi-contact mode* или *tapping mode*)
3. Бесконтактный (англ. *non-contact mode*)

Полуконтактный режим работы атомно-силового микроскопа:

При работе в полуконтактном режиме возбуждаются колебания кантилевера. В нижнем полупериоде колебаний кантилевер касается поверхности образца. Такой метод является промежуточным между полным контактом и полным бесконтактом.

Достоинства метода:

- Наиболее универсальный из методов АСМ, позволяющий на большинстве исследуемых образцов получать разрешение до 0,1 нм
- Латеральные силы, действующие на зонд со стороны поверхности, устранены - упрощает интерпретацию получаемых изображений.

С помощью АСМ определяются:

- толщина пленки
- шероховатость
- дефекты поверхности

Требования к поверхности: ограничений по материалу практически нет, главное - чтобы поверхность была сухая и не осыпалась, иначе будет налипание на кантилевер, что сильно исказит результаты. Геометрические размеры не должны превышать 40*40мм(ш*д) и 15 мм в высоту, вес образца - не более 100 г, рельеф поверхности - менее 9 мкм.

Сравнение методов.

Проанализировав каждый из методов, можно сравнить их по основным критериям - скорость измерений, стоимость оборудования, требуемая подготовка персонала и др.

Заметим, что все приведенные в статье методы - неразрушающие.

Результаты сравнения приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Название метода	Достоинства	Недостатки
Эллипсометрия	- простота и быстрота измерений - возможность проведения измерений в различных условиях	- сложность интерпретации результатов измерений для сложных веществ
Рентгенодифрак-ционный анализ	- относительно дешевое оборудование - высокая скорость измерений	- ограничения по оптическим параметрам поверхности - сложная расшифровка результатов
Спектроскопия РОР	-высокая точность измерений	- ограничения по материалам подложки и покрытия - требуется высококвалифицированный персонал - долгий процесс измерений

Растровая электронная микроскопия	- высокая точность измерений	- натекание заряда на диэлектрические поверхности / дорогое оборудование для снятия заряда - дополнительная подготовка образца
Атомно-силовая микроскопия	- высокая точность измерений - высокая скорость измерений	- ограничение по размеру образца

Проведение измерений

Краткое описание методики определения толщины пленки:

“Метод ступеньки” заключается в получении изображения на границе нанесения пленки и последующем измерении разницы высот подложки и пленки.

Измерения проводились на зондовом микроскопе Ntegra Spectra, для обработки изображений использовалась программа Gwyddion.

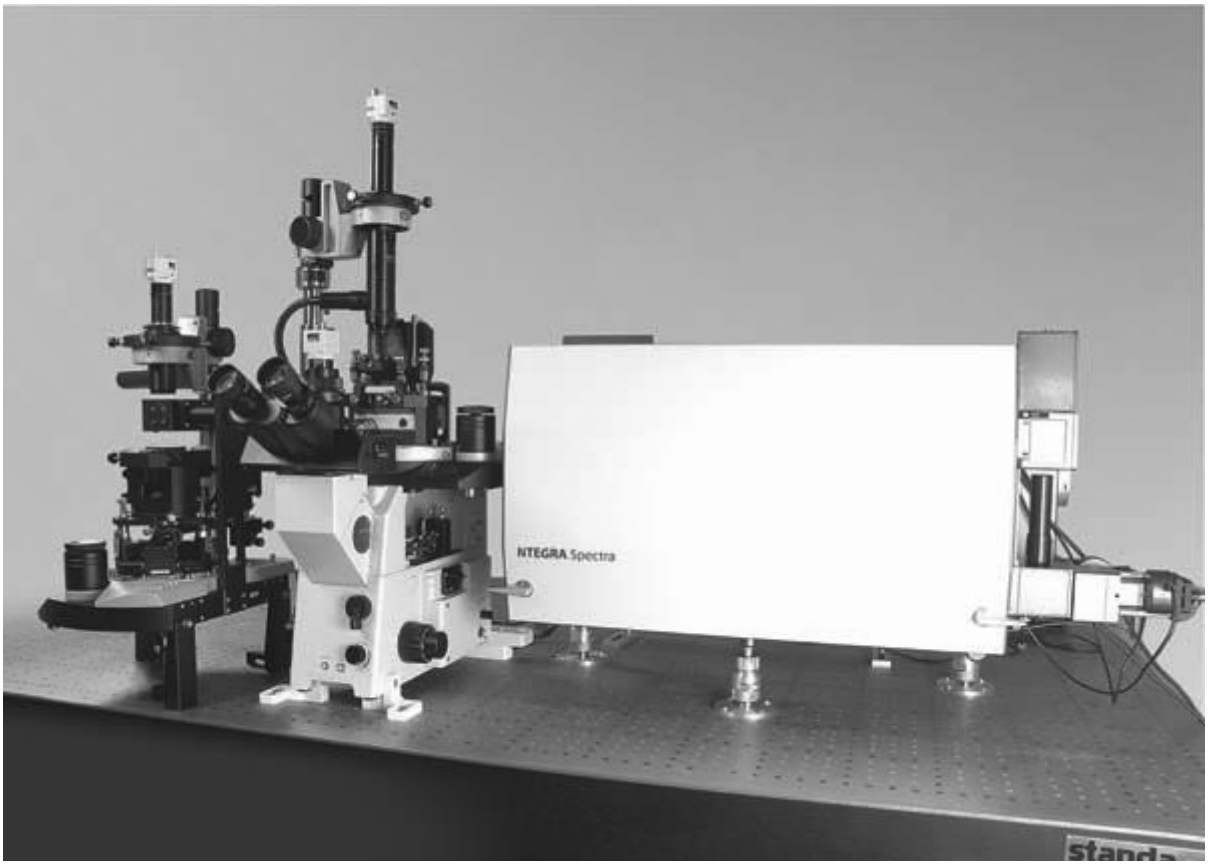
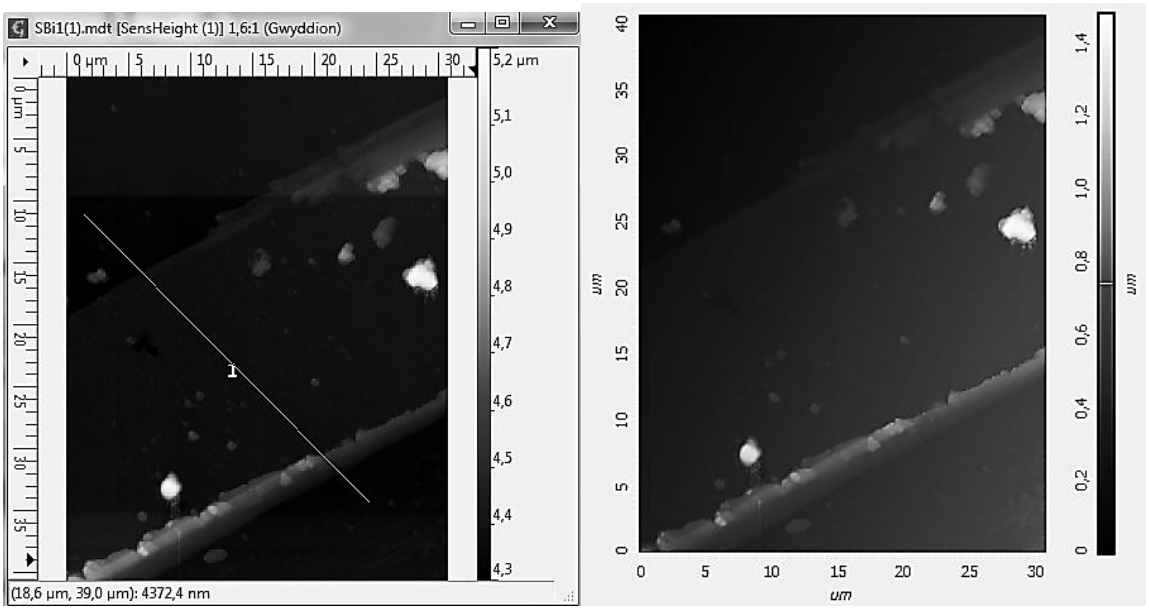
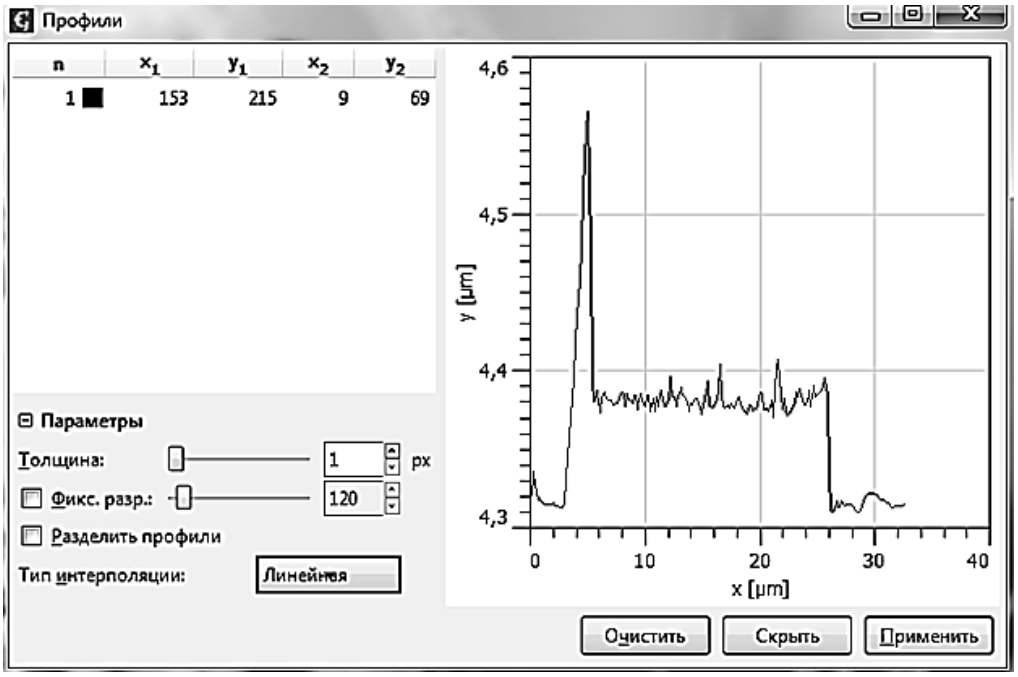


Рис. 7. Внешний вид зондовой нанолаборатории Ntegra Spectra

Для измерений были выбраны:
образец 1. пленка Sbi на Si подложке (толщина 74 нм)
образец 2. пленка p-Ni-Bi-Te-Sb на Si подложке (толщина 230 нм)
образец 3. пленка SSb на Si подложке (толщина 85 нм)

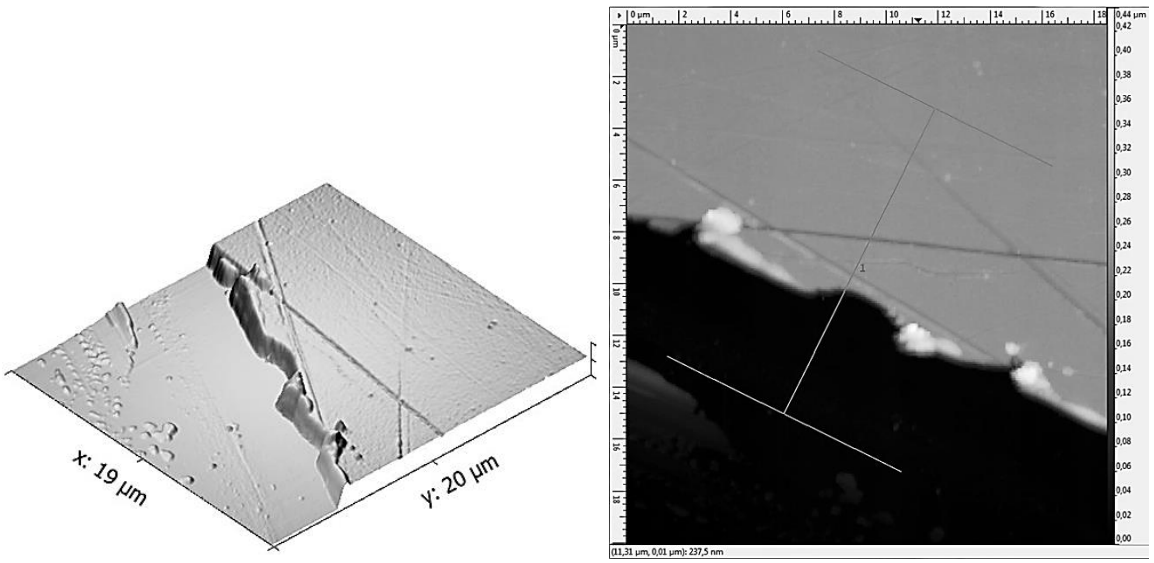


а б

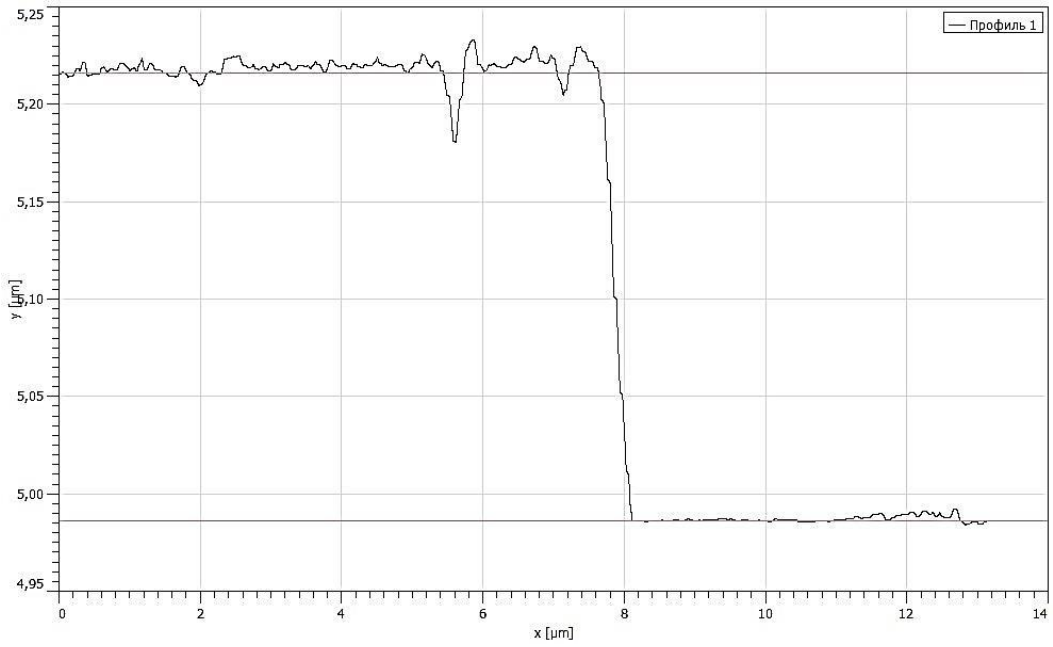


в

Рис. 8.Образец 1: а) 3D-изображение поверхности образца, б) обработка изображения, в) измерение толщины пленки на выбранном профиле.

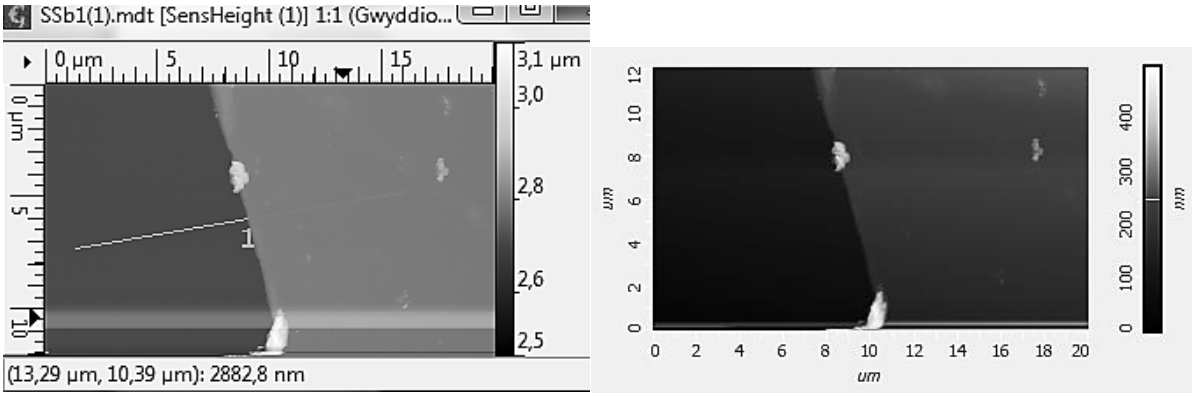


а б

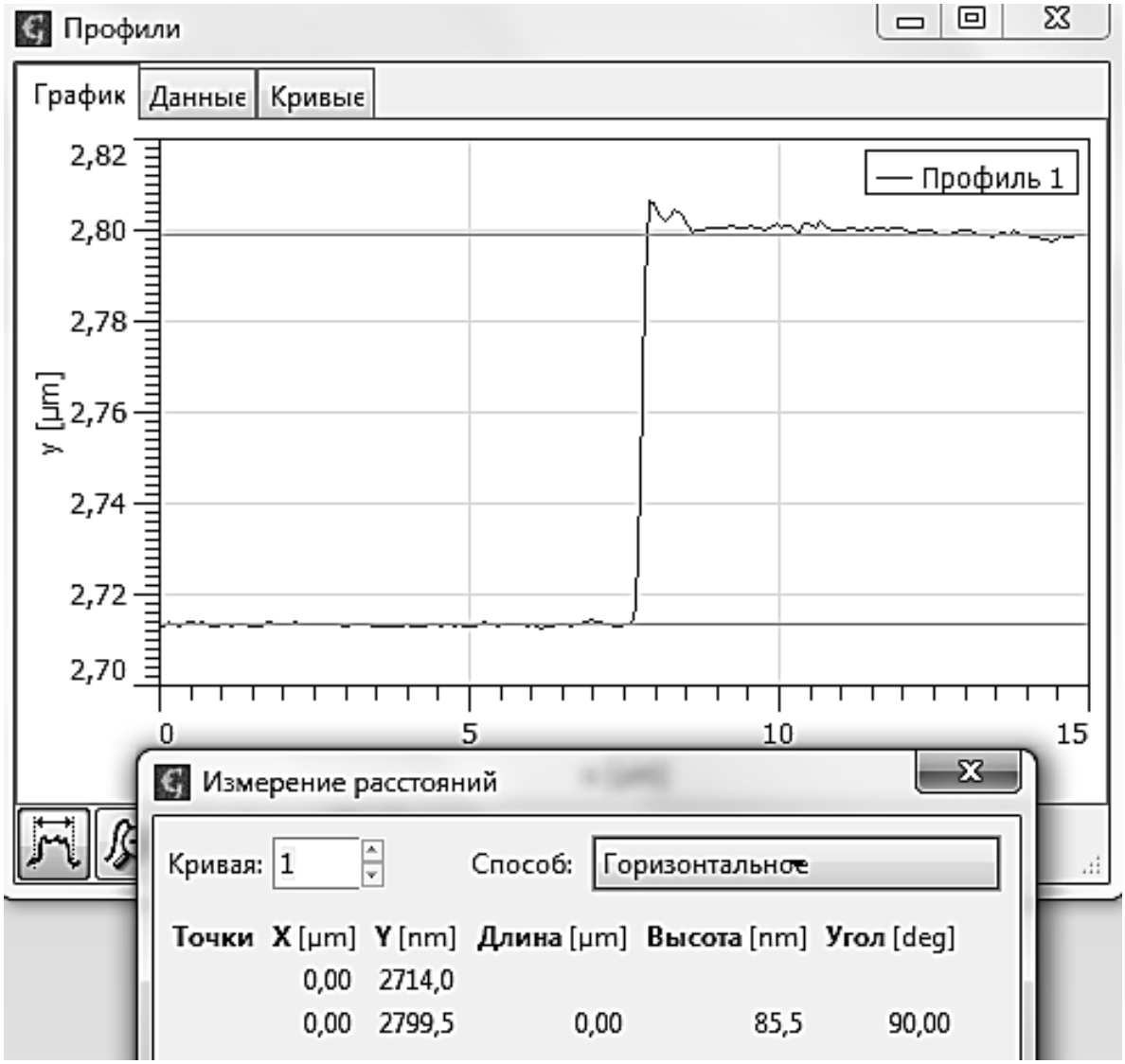


в

Рис. 9. Образец 2: а) 3D-изображение поверхности образца, б) обработка изображения, в) измерение толщины пленки на выбранном профиле.



а б



в)

Рис. 10. Образец 3: а) 3D-изображение поверхности образца, б) обработка изображения, в) измерение толщины пленки на выбранном профиле.

Заключение

При нарастающей в последнее время популярности нанотехнологий, в частности создания нанопокрытий, в литературе встречается достаточно много информации на тему исследований стехиометрии, топологии, морфологии и др., но мало кто освещает измерения толщин пленок.

Данный обзор - лишь начало исследований в данном направлении, и затронул только пять наиболее распространенных методов измерения толщин тонких пленок, не упомянув другие методы, подходящие для данной цели, такие как оже-спектроскопия, профилометрия, ионная микроскопия и др. Цель статьи - ознакомление с возможными решениями задачи такого рода измерений.

Каждый из рассмотренных методов имеет свои достоинства. Эллипсометрия хороша при работе с простыми веществами, но для сложных – практически не пригодна. Для рентгеноструктурного анализа применяется относительно дешевое оборудование, но при измерениях придется столкнуться со сложной обработкой результатов. РОР и РЭМ чрезвычайно точны, но для РОР необходим хорошо подготовленный персонал, а у РЭМ возникает проблема с затеканием заряда.

На фоне остальных методов стоит выделить АСМ. Этот метод имеет высокую точность измерения, прост и удобен в обработке результатов, а размеры образца ограничены лишь конструкцией микроскопа.

В статье приведены примеры измерений на атомно-силовом микроскопе с обработкой результатов.

В дальнейшем планируется более глубокое исследование рассмотренных методов и сравнение экспериментальных результатов.

Литература

1. А.Е. Шупенев «Развитие тонкопленочных технологий: от мыльных пузырей к современным нанотехнологиям» Молодежный научно-технический вестник # 05, май 2013
2. А.Г. Григорьянц, А.И. Мисюров, А.Е. Шупенев «Особенности формирования субмикронных пленок теллурида висмута методом импульсного лазерного осаждения» Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Мешиностроение». 2012 (http://engjournal.ru/articles/234/html/index.html#/2-3/)
3. Григорьянц А. Г., Макаров В. В., Мисюров А. И., Башков В. М., Шупенев А. Е., Миронов Ю. М. «Анализ поверхности тонких пленок Bi2Te3 осажденных методом импульсной лазерной абляции» Наука и образование: Электронное научное издание. (http://technomag.bmstu.ru/doc/239713.html)
4. Словарь нанотехнологических и связанных с нанотехнологиями терминов http://thesaurus.rusnano.com/wiki
5. В.К. Егоров, Е.В. Егоров «Ионопучковые методы неразрушающего количественного контроля наноструктур» Материалы 10 Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России», Москва: Техномаш, 2004. стр. 82-103

УДК 621.373.826

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С КАРБИДАМИ ВОЛЬФРАМА ТЕХНОЛОГИЕЙ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ

Михаил Валентинович Лукьянов,
студент 6 курса,
кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Р.С. Третьяков,
кандидат технических наук, ассистент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении»

Введение

Развитие современной техники предъявляет все более жесткие требования к материалам, а повышение износостойкости деталей является актуальной задачей для многих отраслей промышленности. Перспективным вариантом решения этой задачи является нанесение на детали, подверженные интенсивному износу, композиционных покрытий.

Композиционный материал (КМ) – неоднородный сплошной материал, состоящий из двух или более компонентов, среди которых можно выделить упрочняющие или армирующие элементы, обеспечивающие необходимые механические характеристики материала, и матрицу, обеспечивающую совместную работу армирующих элементов.

Свойства этих материалов в основном зависят от физико-механических свойств компонентов и прочности связи между ними. Отличительной особенностью материалов является то, что в них проявляются достоинства компонентов, а не их недостатки. Вместе с тем композиционным материалам присущи свойства, которыми не обладают отдельные компоненты, входящие в их состав. Для оптимизации свойств выбирают компоненты с резко отличающимися, но дополнительными друг от друга свойствами [1]. Композиционные материалы имеют высокие показатели удельной и усталостной прочности, обладают повышенной износостойкостью, обеспечивают размерную стабильность конструкции. В настоящий момент актуально создание и внедрение инновационных конструкционных материалов с высокими физико-механическими свойствами. Среди конструкционных материалов получают широкое распространение карбидостали – композиционные материалы, состоящие из легированной стали и карбидов с массовой долей от 20 до 70%. По своим свойствам они занимают промежуточное положение между сталями и твердыми сплавами [2]. Использование карбида вольфрама в качестве упрочняющей фазы в стальной матрице позволяет повысить твердость, прочность и износостойкость.

Получение композиционного материала возможно либо расплавлением матрицы и добавлением упрочняющих частиц, либо переплавкой всех компонентов с последующим выделением требуемых структур. В первом случае необходимо расплавить лишь матрицу, сохранив в карбиде исходную структуру. Во втором случае необходимо расплавить весь материал без значительного испарения, и уже из общей жидкой ванны получить выделившиеся при кристаллизации упрочняющие фазы. Если это осуществляется с помощью неконцентрированных источников энергии, высокие погонные мощности процесса ведут к значительному разогреву подложки и её деформации. Концентрированные источники позволяют нагреть подложку и наплавляемый материал точечно, с минимальным вводом теплоты. К концентрированным источникам теплоты относят электронно-лучевые и лазерные источники.

Лазерная наплавка заключается в послойном локальном расплавлении порошков и их сплавлении с поверхностью обрабатываемого металла, в связи с этим, погонные мощности процесса ниже, чем при применении дуговых и плазменных методов, соответственно, тепловое воздействие на подложку минимально [3]. Благодаря локальности воздействия и гибкости регулирования параметров процесса получение композитного покрытия метод лазерной наплавки позволяет наносить большое разнообразие наплавляемых материалов и их комбинаций.

Материалы и оборудование

Процесс лазерной наплавки проводился на роботизированном лазерном комплексе с использованием волоконного лазера (робот ABB IRB 2400 + вращатель МТС-250; волоконный лазер ЛС-4К). Лазерное распылительное сопло с многоструйной подачей порошка (голова для наплавки YC-50) обеспечило нанесение валиков шириной около 4 мм и высотой 1-1,2 мм за один проход. Толщина слоя при перекрытии 50% составляла для опытных составов 2 – 2,5 мм. Таким образом, требуемая толщина слоя достигается за меньшее число термических циклов нагрева окружающего металла до высоких температур, более 800^{o}C. Подача порошкового материала осуществлялась с помощью дозатора имеющего 2 колбы.

В качестве присадочного материала использовался металлический порошок, полученный методом газовой атомизации расплава. Гранулометрический состав частиц соответствует требованиям технического задания: все используемые порошки имеют размер фракции от 40 до 150 мкм. Химический состав использованных порошков представлен в таблице 1, теплофизические свойства – в таблице 2. Порошки на

никелевой основе являются самофлюсующимися сплавами с высокой коррозионной стойкостью и стойкостью к абразивному износу.

В качестве упрочняющей фазы использовались два вида карбидов вольфрама: колотые и агломерированные карбиды. Агломерированные карбиды вольфрама в кобальтовой обвязке, представляют собой мелкие колотые карбиды, объединенные в сферические частицы с помощью кобальтовой основы. Такие карбиды вплавляются в матрицу и образуют сплошной равномерный переход без искажений решетки и образования микродефектов.

Таблица 1. Химический состав порошков, использованных для создания покрытия

Марка порошка	Содержание элементов, %							
	C	Fe	Co	Ni	Cr	W	Si	B
ПГСР-4	0,75	3,7	-	основа	28,5	4,4	1,0	3,1
ПР-НХ	0,73	4,38	-	основа	15,9	-	3,18	2,65
WC/Co	8	-	12	-	-	80	-	-
WC	12	-	-	-	-	88	-	-

Таблица 2. Теплофизические свойства использованных порошков

Марка порошка	Теплофизические свойства		
	Температура плавления, С	Плотность, г/см3	Твердость, HRC
ПГСР-4	1100	8	60-62
ПР-НХ	1100		47-50
WC/Co	1350-1400	11	-

Наплавка на опытные образцы

Наплавке проводилась на экспериментальные образцы размером 50х30х20 мм. Производилось варьирование режимов и процентного содержания карбидов вольфрама.

Для исключения трещин использовался предварительный подогрев заготовок до температуры 450 ^{o}C.

Никелевый сплав типа ПГСР-4

При наплавке на экспериментальные образцы размером 50х30х20 мм трещин и пор не выявлено, карбиды остались нерастворенными (рис. 1-2). На рисунке 1 представлена макроструктура зоны сплавления с подложкой. Сплавление ровное, карбиды распределены равномерно по всей толщине и протяженности покрытия. Наплавка производилась в один проход, толщина покрытия составила 2,2 мм. Твердость покрытия составила при различных значениях содержания карбида вольфрама от 61 до 67 HRC (таблица 3). С увеличением содержания карбидной фазы в наплавленном слое происходит повышение твердости и хрупкости, поэтому оптимальное содержание WC/Co (40 % по объему) выявлено в образце № 1, так как этот образец отличается наиболее равномерным распределением карбидов по толщине и протяженности покрытия.

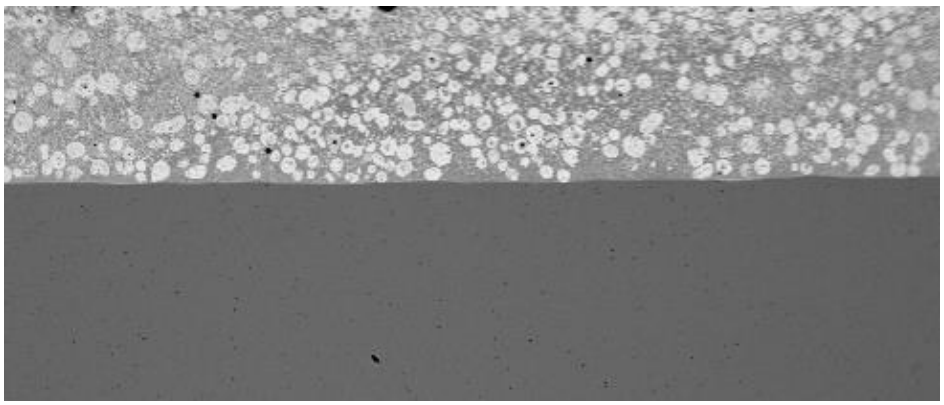


Рис. 1. Зона сплавления основного металла и наплавленного слоя

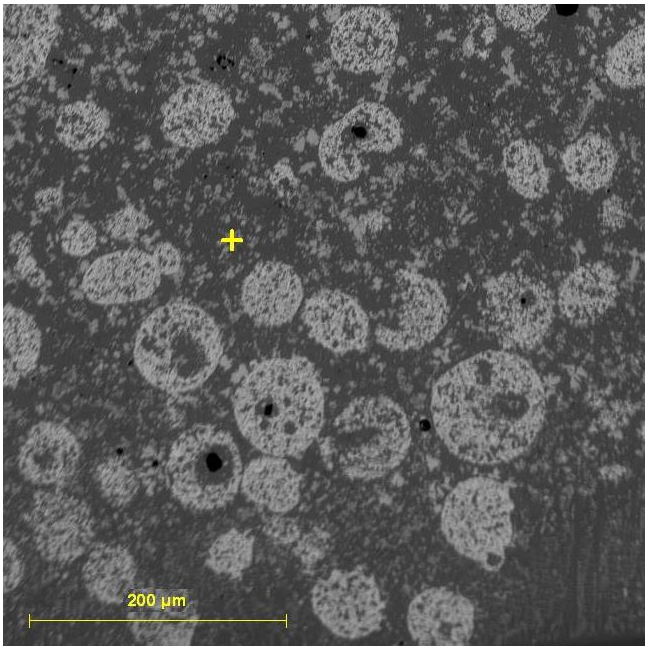


Рис. 2. Нерастворенные карбиды и микропоры внутри частиц порошка

Таблица 3. Значения твердости на образцах лазерной порошковой наплавки

	ПГСР-4	WC/Co	№ образца	HRC
Доля материала, % по объему	60	40	1	65-66
	50	50	2	61-66,5
	40	60	3	64-67,5

В результате предварительных исследований образцов принято решение наплавлять данный сплав на опытные детали. Однако механическая обработка сплава с такой высокой твердостью привела к его разрушению.

Никелевый самофлюсующийся сплав типа ПР-НХ16СР3

Используемый никелевый сплав с меньшей, чем в первом случае, твердостью (не более 50 HRC), является самофлюсующимся. Анализируя предварительные исследования, было принято решение наплавлять данный сплав на опытные детали с добавлением колотых карбидов вольфрама. На образцы было нанесено 4 варианта состава на различных режимах (таблица 4).

Таблица 4. Исследованные режимы нанесения композиционных покрытий на основе никелевого сплава ПР-НХ

№ образца	ПР-НХ, % по объему	WC/Co, % по объему	Мощность лазерного излучения, Вт
1	55	45	2 000
2	60	40	2 000
3	50	50	1 800
4	50	50	2400

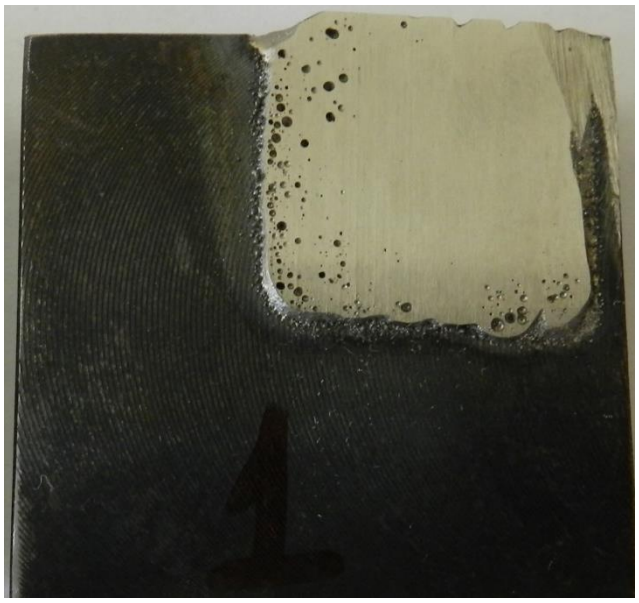
Процесс нанесения материала являлся стабильным, в широком окне режимов формирование слоев равномерное. Покрытия, обработанные шлифованием, показаны на рисунке 3.

Результаты исследований. Образцы с №№1 и 3 показали высокую износостойкость, сравнимую с требуемой. Образцы, нанесенные на режимах №№2 и 4 – сравнительно меньшую износостойкость. Наиболее подходящим признано покрытие с №1, однако в нем присутствуют дефекты – пористость. Данный дефект было необходимо устранять технологическими мерами:

1.Тщательная подготовка поверхности заготовки: обезжиривание, очистка, предварительный подогрев.

2.Подготовка порошковой смеси: просев, просушка.

3.Повышение погонной мощности процесса для компенсации рассеяния тепла в массивной детали.





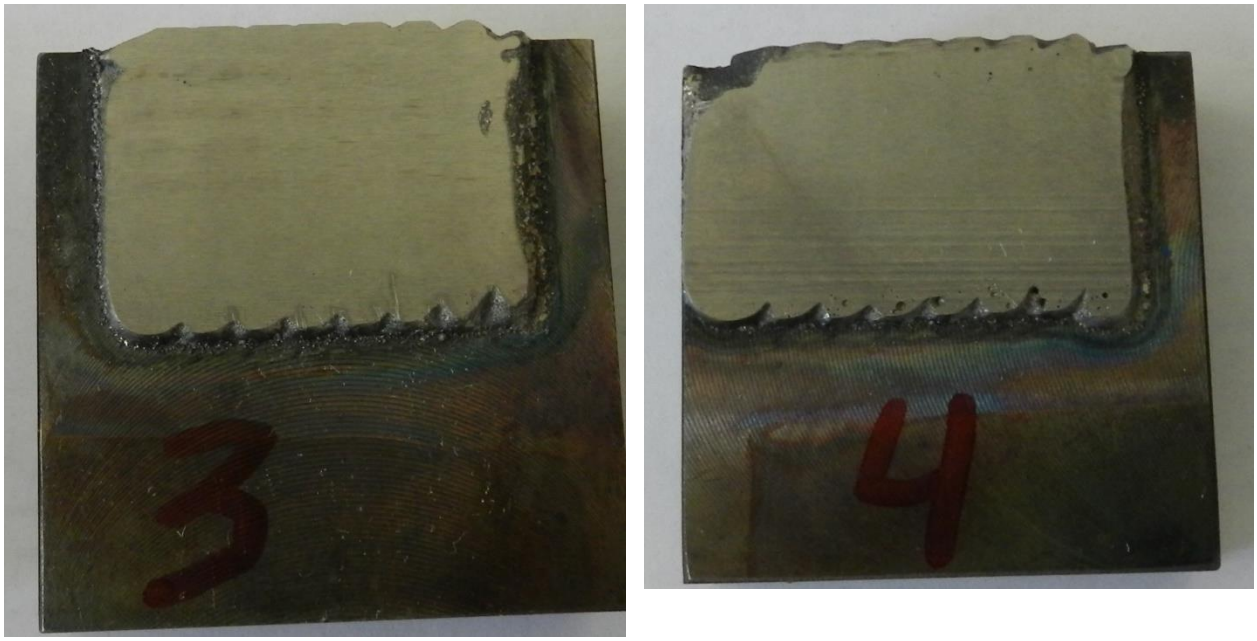


Рис. 3. Образцы наплавки №1-4 после обработки шлифованием

Наплавка на образцы с рабочими размерами

Наплавка производилась на очистные ножи для повышения износостойкости. Процесс наплавки на детали с реальным размером отличается по картине распределения температур от процесса наплавки на небольшие заготовки. По этой причине режимы, полученные на предварительном этапе, пришлось корректировать для наплавки на больших деталях. Наплавлялся состав на основе никелевого самофлюсующегося сплава типа ПР-НХ16СР3 с добавлением колотых карбидов вольфрама.

В результате серий экспериментов на сплаве ПР-НХ16СР3 с добавлением карбидов вольфрама в кобальтовой обвязке установлено, что стабильность процесса нанесения не получена, карбиды расположены равномерно, однако износостойкость таких покрытий одновременно с высокой трещиностойкостью достигнуть не удалось. Поэтому принято решение использовать в качестве упрочняющих частиц колотый карбид вольфрама. Размер фракций составляет 50-150 мкм, частицы имеют неправильную форму и более крепко держатся в вязкой матрице.

Порошковая смесь из ПР-НХ16СР3 и колотых карбидов вольфрама наплавлена на участок ножа в рабочем размере на режиме, указанном в таблице 5.

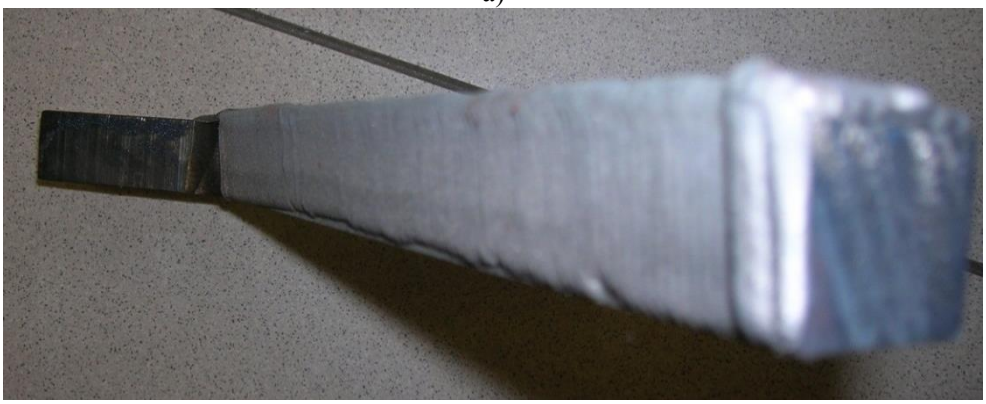
Таблица 5. Рабочий режим нанесения покрытия

Параметр	Величина
Мощность, %	36-38
Скорость перемещения, мм/с	5
Шаг между валиками, мм	2,5
Расход порошка ПР-НХ16СР3, % по объему	60
Расход порошка WC, % по объему	40
Подложка	сталь 20
Подогрев, градусов С	550
Примечания	подогрев в сборе с оснасткой; толщина слоя по выступам валиков - 2,2 – 2,4 мм

В ходе работы после серии экспериментов на рабочих ножах был установлен режим нанесения и состав покрытия. На этом режиме нанесено покрытие на опытный нож (рисунок 4). При обработке на рабочем торце обнаружились сколы и отдельные трещины, однако покрытие не разрушилось. Полученная деталь показала износостойкость в реальных рабочих условиях выше требуемой.



а)



б)

Рис. 4. Работоспособный нож после нанесения покрытия, а) – вид сверху, б) – вид сбоку

Результат исследований

В результате проведенных исследований был разработан композиционный состав, состоящий из никелевого самофлюсующегося сплава (ПР-НХ16СР3) с добавлением колотых карбидов вольфрама (WC). Объемное соотношение компонентов состава: 60% никелевого сплава ПР-НХ16СР3 и 40% колотых карбидов вольфрама. Массовое соотношение составляет: 44% - ПР-НХ16СР3 и 56% - карбиды вольфрама. Окончательный режим нанесения представлен в таблице 6. Химический состав порошкового материала ПР-НХ16СР3 представлен в таблице 7. Карбиды вольфрама имеют размеры фракций 50 – 150 мкм.

Установлено, что при нагрузке в виде гидроабразивного износа композиционные сплавы с использованием колотых карбидов вольфрама проявили более высокую износостойкость, чем сплавы с агломерированными карбидами. По-видимому, это связано с прочностью сцепления отдельных частиц с вязкой матрицей. Более твердый сплав ПГСР-4 оказался непригоден в качестве вязкой матрицы основы по причине высокой твердости и хрупкости, приведших в процессе механической обработки к механическому разрушению всего покрытия, его растрескиванию. В таблице 6 указаны параметры технологии наплавки для получения покрытия с оптимальными свойствами.

Таблица 6. Параметры режима нанесения композиционного покрытия, признанного оптимальным

Параметр	Величина
Мощность лазерного излучения	1900 Вт
Скорость перемещения лазерного луча	5 мм/с
Расход порошка	6 об.ед. – ПР-НХ16СР3 (63-120 мкм)

	4 об. ед. – WC колотый (50-150 мкм)
Шаг между валиками	2,5 мм
Предварительный подогрев	550 градусов С

Таблица 7. Химический состав сплава ПР-НХ16СР3

	Содержание элементов, % по массе.					
Обозначение	Fe	Ni	C	Cr	Si	B
ПР-НХ	4,38	осн.	0,73	15,9	3,18	2,65

Выводы

В результате проведенных исследований получено покрытие с требуемыми характеристиками, и выявлены наиболее оптимальные характеристики процесса: композиционный состав наносимого покрытия, объемное и массовое соотношение компонентов, а также режим нанесения. В настоящей работе указывается на перспективность использования лазерной наплавки для получения износостойких композиционных материалов.

Литература

1. Материаловедение : учебник для вузов / Арзамасов Б. Н., Макарова В. И., Мухин Г. Г. и др. ; общ. ред. Арзамасов Б. Н., Мухин Г. Г. - 6-е изд., стер. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. - 646 с. : ил.
2. *Новиченко Д.Ю.* Разработка и исследование процесса прямого лазерного изготовления детали из композиционного материала на основе стали и карбида титана: авто-реф. дис. канд. тех. наук / Д.Ю.Новиченко ; Моск. гос. тех. ун-т. им. Н.Э. Баумана – М., 2011. – 18 с.
3. Deposition of graded metal matrix composites by laser beam cladding. C. Theiler, T. Seefeld, G. Sepold/ Bias Bremen Institute of Applied Beam Technology, Germany

УДК 621.373.826

ПОЛУЧЕНИЕ ПСЕВДООБЪЁМНЫХ БУКВ НА ПЛАСТИКЕ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ

Степанов Дмитрий Владимирович,
студент 6 курса,
Кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Богданов А.В.
кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении»

В настоящее время существует несколько технологий маркировки пластика. Такие как лазерная маркировка, фрезеровка, гравировка при помощи пескоструйной обработки. Рассмотрим каждый метод. Метод Фрезеровки осуществляется остро заточенной вращающейся фрезой путем резки материала. При таком методе гравировки пластика выделяется много отходов в виде пластиковой крошки. Для ее удаления нужна специальная система аспирации с системой фильтров. Такое оборудование удаляет крошку в течение всего процесса гравировки. Таким образом предотвращается возможное загрязнение поверхности обрабатываемого материала. Следующий метод пескоструйная обработка или абразивная обработка – это метод маркировки, который основывается на повреждении поверхности обрабатываемого материала песком или иным абразивным порошком, распыляемым потоком воздуха из специального абразивоструйного аппарата. При соприкосновении абразивного порошка с обрабатываемым материалом его поверхность разрушается и тем самым создается маркировка. Регулируя давление и меняя зернистость песка, можно получить различную степень сплошной маркировки. Выше названные методы можно отнести методам макро воздействия на материал. Лазерная маркировка материала тяготеет к методам микро и даже нано воздействиям на материал в силу своей специфики [1]. Лазерная маркировка, имеет наиболее широкое распространение из всех вышеперечисленных методов, что обусловлено легкостью ее применения, возможностью маркировки различных материалов и доступностью используемого оборудования. Гравировка наносится при помощи лазерного луча, сфокусированного с помощью специальных зеркал и линз. В зависимости от режима работы лазера, параметров техпроцесса получают различное качество обработки и свойства полученного изделия[2]. Энергия лазерного луча настолько велика, что она способна испарить часть материала и выполнить маркировку на поверхности или внутри материала, причем пятно воздействия одиночных импульсов настолько миниатюрно, что может применяться в нано технологиях [3]. Метод маркировки при помощи лазерного излучения обладает следующими достоинствами: многие лазерные станки занимают мало места, работают тихо, обучение работе на них не занимает много времени. С помощью лазерных маркеров и граверов можно создавать такие детали, как крошечный текст, рисунок, нанести фотографию на поверхность или внутрь материала. Лазерный станок может работать с различными материалами и не требует для этого никаких модификаций. Далее мы будем рассматривать только обработку пластиков. Достаточно часто для получения изделий с маркировкой или гравировкой используют специально разработанные для этих целей пластики. В нашем случае использовался пластик, не предназначенный специально для лазерной гравировки. Маркировка производилась на установке MARS 20J. Общий вид установки представлен на рисунке 1.



Рис.1 Общий вид волоконного оптического маркера MARS 20J.

Установка предназначена для маркирования импульсным лазерным излучением с длиной волны 1060-1070 нм различного рода заготовок, инструментов и деталей из металлов и сплавов, полупроводниковых материалов, пластмасс и дерева путём нанесения символов, буквенно-цифровой или графической информации на их поверхность.

В качестве источника лазерного излучения в установке используется иттербиевый волоконный лазер, технические характеристики которого представлены в таблице 1.

Таблица №1 Основные технические данные и характеристики

Длительность импульса излучения, нс	Частота повторения импульсов, кГц	Максимальные размеры поля маркировки, мм²	Максимальная мощность, потребляемая лазером, Вт, не более	Средняя мощность лазерного излучения, Вт	Диаметр пятна, мкм
100	20 – 50	160×160	220	20	70

Для создания изображения используется специальное программное обеспечение. Применяется несколько видов программ, которые включают в себя создание двухмерной надписи, обработка и конвертация в нужный формат двухмерных файлов, программа управления установкой и настройкой необходимых параметров (установка размера обрабатываемой области, мощности, и т.д.). Идеология построения и взаимодействия этих программ соответствует описанным в [4].

При обработке этой марки пластика было замечено, что при определенных режимах работы лазера[5], материал не сгорает под воздействием излучения и не испаряется, а занимает промежуточное положение. При этом формируется определенный слой, который выглядит как объемная фигура. Для случая получения букв – это псевдо объемные фигуры, незначительно возвышающиеся над поверхностью обработанного материала.

Ниже приведены таблицы и графики с диапазонами изменения скоростей, частот и мощности лазера. На основании этого были найдены режимы обработки, при которых достигается наилучшее качество обработанной поверхности, а также различные шрифты, обеспечивающие более качественный внешний вид изделия.

Для оценки качества обработанной поверхности введена 10-бальная система, где 1 балл соответствует некачественной поверхности, а 10 баллов - максимальное качество.

Мощность лазерного излучения высчитывали в % от максимальной, которая составляла 20 Вт. В таблице 2 представлены режимы обработки для маркировки текста с различной по качеству поверхностью букв. Шрифт Arial, размер 5. Наносилось изображение текста «опыт».

Таблица №2 Режим обработки для маркировки букв. Шрифт Arial, 5 а текст «опыт».

№ опыта	Скорость маркировки (мм/с)	Скорость перехода (мм/с)	Q(частота)КГц	P(мощность), %
1	500	1000	20	50
2	400	1000	20	50
3	300	1000	20	50
4	800	1000	20	50
5	1000	1000	20	50
6	2000	1000	20	50
7	2000	2000	20	50
8	2000	500	20	50
9	2000	100	20	50
10	1000	100	20	50
11	400	1000	30	50
12	400	1000	40	50
13	400	1000	40	60
14	1000	1000	20	60

На рисунке № 2 представлен график №1 построенный по таблице №2 опыты с №1-10. Из графика видно, как скорости маркировки и перехода влияют на качество обработанной поверхности.

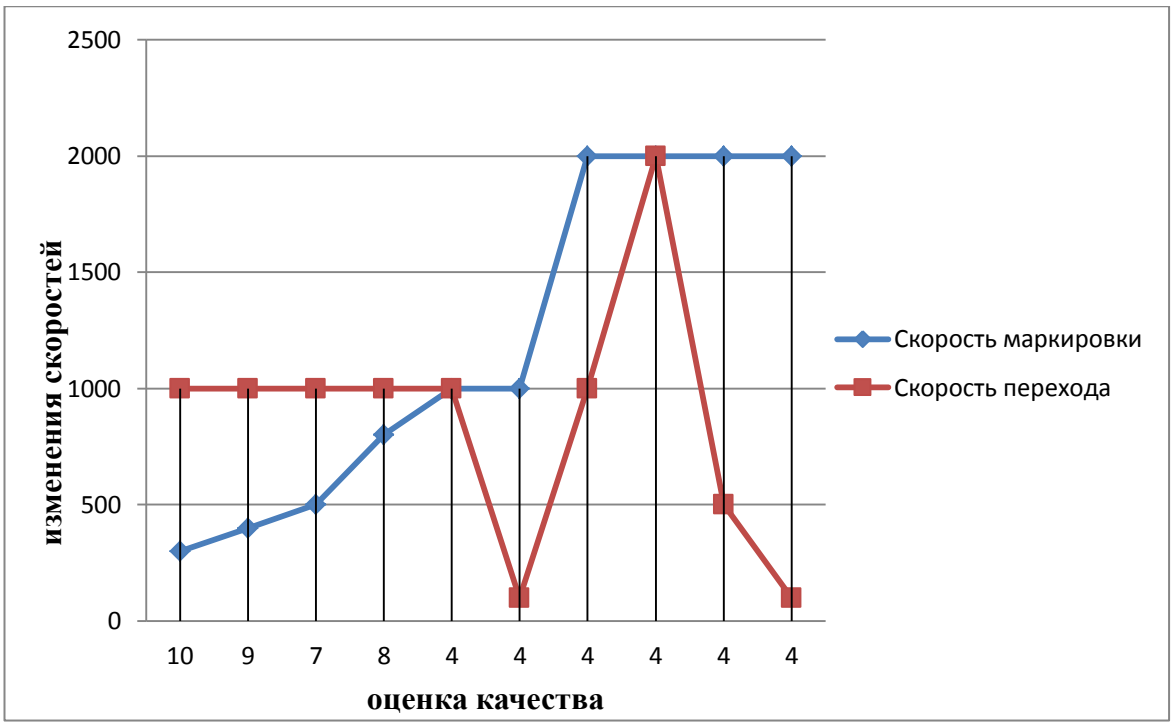


Рис.2 Влияние скорости маркировки и перехода на качество обработанной поверхности.

На рисунке 3 представлен график №2 построенный по таблице №2 опыты с №11-14. На нем показано влияние изменения нескольких параметров работы установки на качество получаемых псевдо объемных букв.

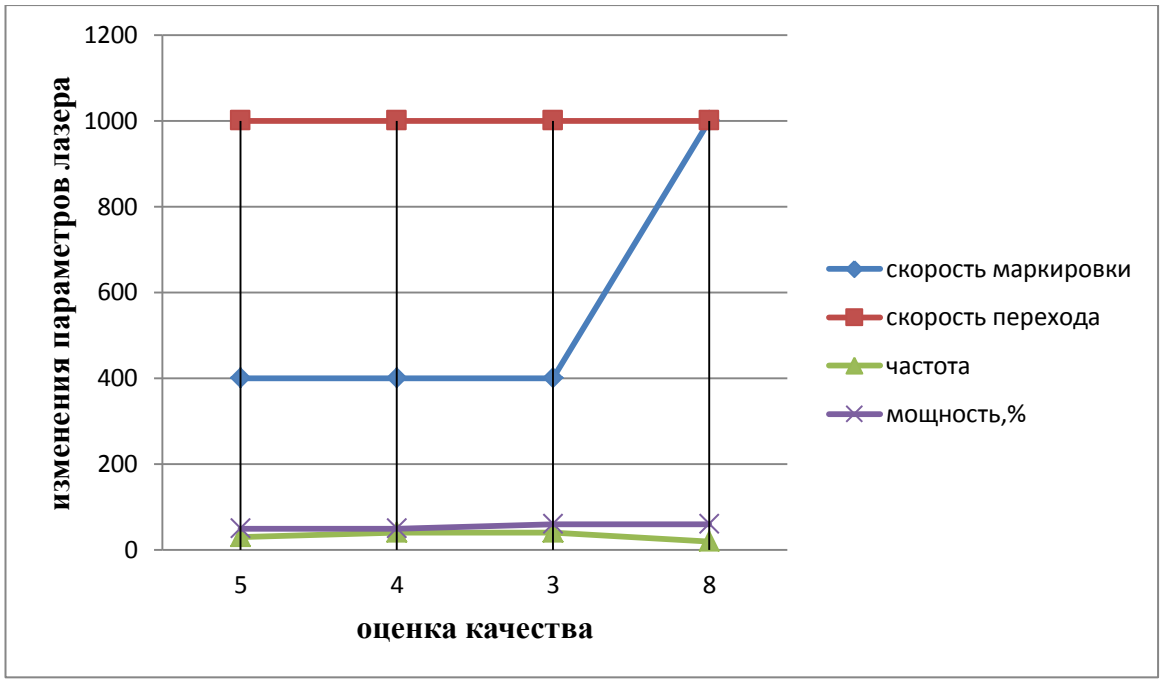


Рис. 3 Влияние режима обработки на качество получаемых псевдо объемных букв.

На рисунке 4 представлена фотография образца, полученного маркировкой на выбранных режимах.



Рис.4 Фотография образца с псевдо объемными буквами.

Ниже в таблице 3 приведен режим работы лазера для маркировки текста с различной по качеству поверхностью. Шрифт Arial black, размер 5, наносилось слово «опыт».

Таблица №3 Режим обработки пластика.

№ опыта	Скорость маркировки (мм/с)	Скорость перехода (мм/с)	Q(частота)КГц	P(мощность), %
1	100	1000	20	50
2	300	1000	20	50
3	600	1000	20	50
4	500	1500	20	50

На рисунке 5 представлены графики на основе данных таблицы №3. На нем показано как скорости маркировки и перехода влияют на качество получаемой поверхности. Фото образца представлено на рисунке 6.

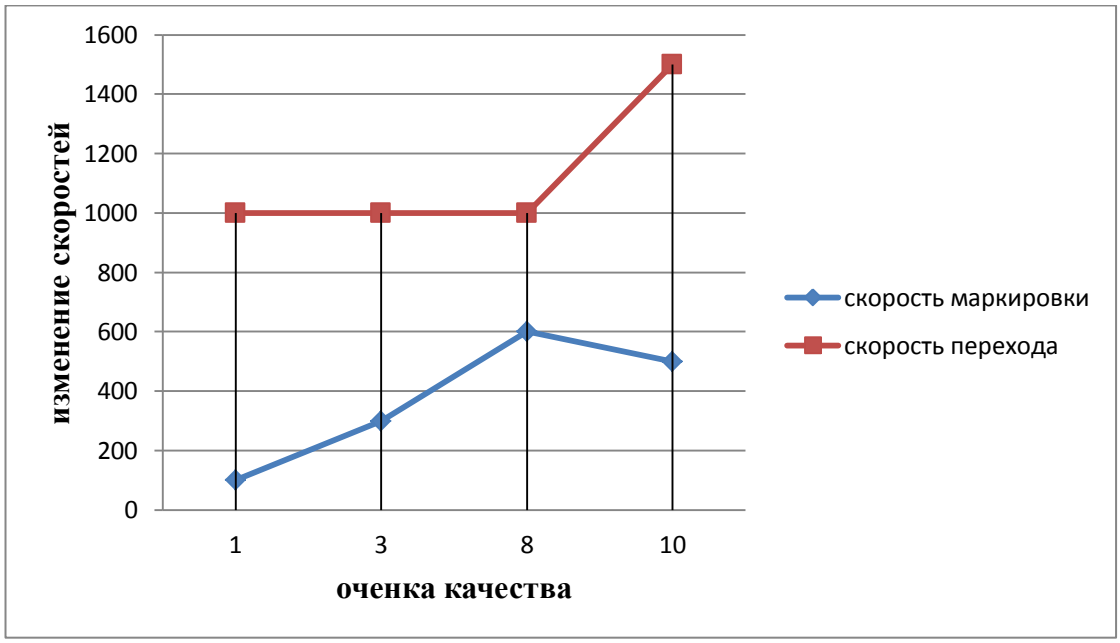


Рис. 5 Влияние скорости маркировки и перехода на качество обработанной поверхности.



Рис. 6 Фото образца для результатов из таблицы 3.

В таблице 4 представлены режимы обработки для маркировки текста с различной по качеству поверхностью. Шрифт Arial black, размер 5, наносилось слово «рой»

Таблица № 4 Режим обработки для маркировки текста.

№ опыта	Скорость маркировки (мм/с)	Скорость перехода (мм/с)	Q(частота)КГц	P(мощность), %
1	1000	1000	20	50
2	1000	400	20	50
3	1000	50	20	50

В таблице 5 представлены режимы обработки для маркировки текста с различной по качеству поверхностью. Шрифт Arial black, размер 5, наносилось слово «9».

Таблица №5 Режим обработки для маркировки текста

№ опыта	Скорость маркировки (мм/с)	Скорость перехода (мм/с)	Q(частота)КГц	P(мощность), %
1	1000	20	20	50

На рисунке 6 приведен график, построенный по таблицам №4 и №5. На нем показано как скорости маркировки и перехода влияют на качество поверхности. Фотография образца с псевдо объемными буквами, соответствующими проведенным экспериментам, приведена на рисунке 7.

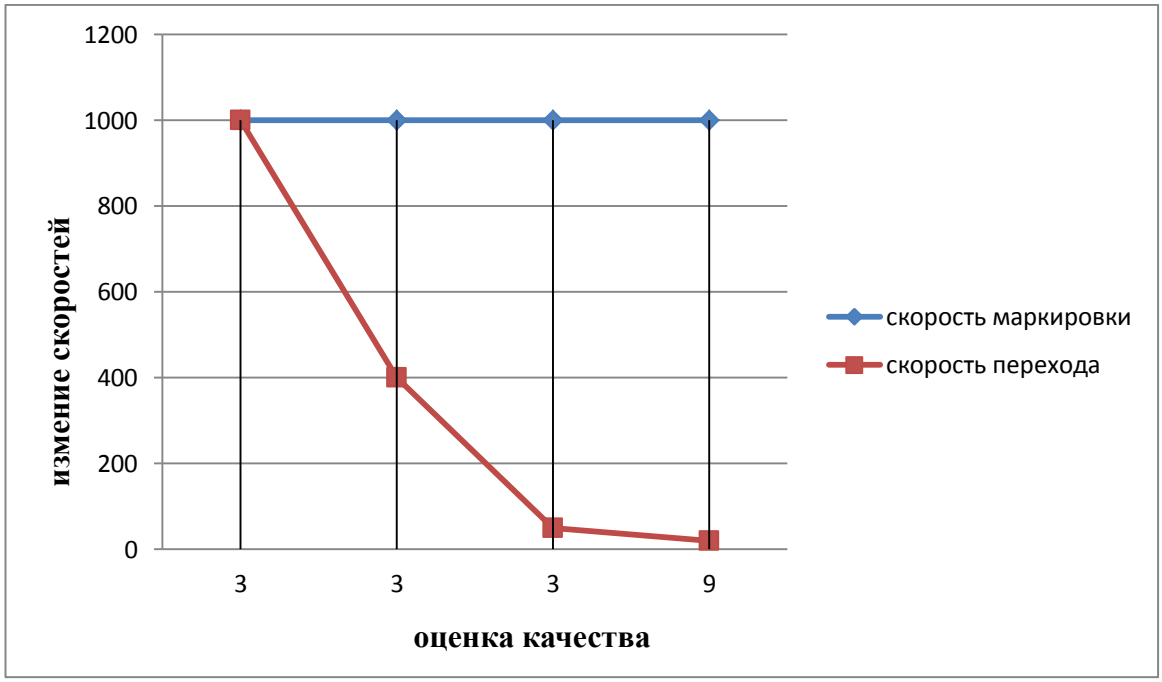


Рис.6. Влияние скорости маркировки и скорости перехода на качество поверхности.



Рис.7 Фотография образца с псевдо объемными буквами

Вывод

На основании поведенных исследования установлено, что существуют режимы обработки пластиков, при которых возможно получение псевдо объемных букв. Необходимо проведение дополнительных исследований для выработки требований к конфигурации наносимых изображений.

Литература

1. Богданов А.В., Мельникова М.А., Мельников Д.М. Исследование особенностей взаимодействия лазерного излучения с полиэтиленом при маркировке. //Материалы **IX** международной научно-практической конференции «Современные научные достижения-2013». Прага, стр. 21-25.
2. Богданов А.В., Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И., Пырикова С.И., Богданова М.А. Перспективы использования лазерного излучения для создания структурных неоднородностей в полимерах. Известия вузов: Машиностроение, № 1, 2011г. с.63-69.
3. Богданов А.В., Савкин А.Н. , Голубенко Ю.В. Лазерное излучение и нанотехнологии. Технология машиностроения 2013 .- № 11 .- С. 42 – 45
4. Богданова А.В., Богданов М.А. Программный комплекс для разработки технологических процессов лазерной обработки с использованием волоконного лазера. Машиностроитель-ные технологии, Сб.докладов Всероссийской научно-техн.конференции, Москва, 2008
5. Богданов А.В., Особенности оценки технологических возможностей промышленных лазеров. Технология машиностроения, №11, 2011

УДК 621.375.826.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГАЗОПОРОШКОВОГО ПОТОКА С ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ПРИ КОАКСИАЛЬНОЙ ПОДАЧЕ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ С РАЗЛИЧНОЙ ФОРМОЙ И РАЗМЕРАМИ ЧАСТИЦ В ПРОЦЕССЕ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ

Алексей Анатольевич Дренин,
студент 4 курса,
кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»,
Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана

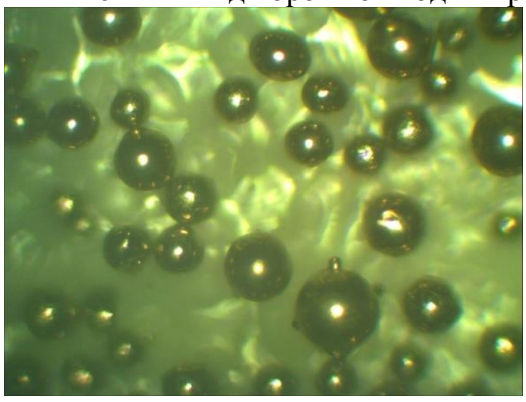
Научный руководитель: Р.С. Третьяков,
к.т.н., ассистент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении»

Лазерная наплавка становится процессом вызывающим большой интерес отраслей, для которых характерна высокая стоимость изготовления деталей. Кроме того, эта технология вводит новые производственные понятия, такие как прямое изготовление деталей, избегая, таким образом, чрезмерного отхода материала в виде стружки, присущей традиционным процессам обработки. Процесс основан на использовании высококонцентрированного источника – лазерного луча, для создания ванны расплава на поверхности подложки, в которую вводится присадочный материал в виде порошка. В связи с тем, что лазерное излучение проходит через газопорошковую струю, его часть теряется, что довольно заметно сказывается на энергетике процесса. Таким образом, при отработке технологии необходимо знать эффективную мощность, которая достигает поверхности основного материала.

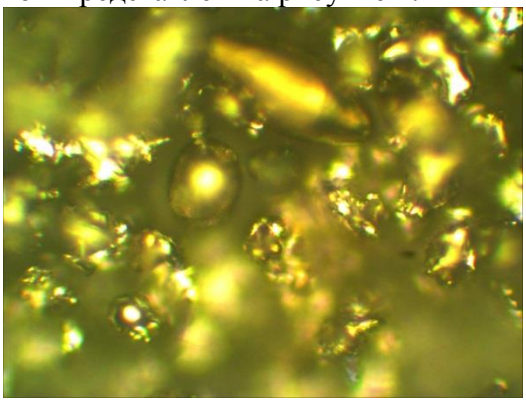
В этой области проходит взаимодействие между лазерным лучом и присадочным материалом с поглощением значительного количества энергии порошковыми частицами. В результате, мощность лазерного излучения, вводимая в подложку, может отличаться от первоначальной существенно. Кроме того, сами порошковые частицы могут достигать подложки как в нагретом, так и в расплавленном состоянии, что влияет на стабильность формирования покрытия.

В данной работе для исследования использовались порошки с малым разбросом размеров частиц, устойчивые к высоким температурам, никелевый сплав ПГСР-4 и нержавеющие стали SS 410 L, SS 316 L.

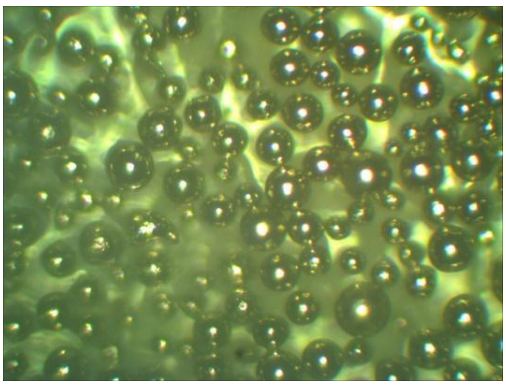
Внешний вид порошков под микроскопом представлен на рисунке 1.



а) Частицы порошка нержавеющей стали SS 316 L, увеличение 100 крат



б) Частицы порошка нержавеющей стали SS 410 L, увеличение 400 крат



в) Частицы порошка никелевого сплава ПГСР-4, увеличение 100 крат

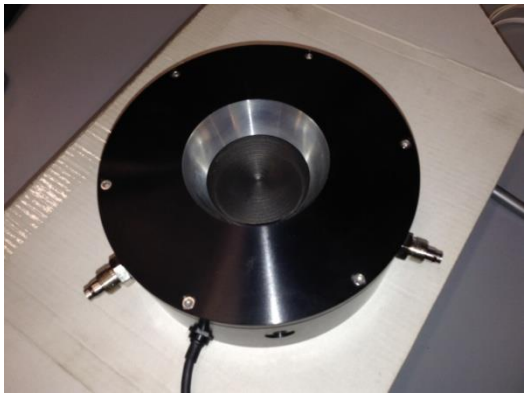
Рис. 1. Внешний вид частиц порошков

Как видно, частицы порошков (Рис. 1 а,в) представляют из себя частицы с минимальным отклонением от сферичности, разброс по фракциям велик, а частицы порошка на рис. 1 б представляют из себя овальные частицы неправильной формы. Различия в форме частиц обусловлены способом получения порошка. По сертификату, фракционный состав порошка SS316 составляет от 20 до 60 мкм, однако для стабилизации расхода и потока при измерениях фракционный состав корректировался: производился отсев более мелких фракций. В результате измерения проводились на порошке с размерами частиц от 20 до 40 мкм, от 40 до 50 мкм, от 50 до 60 мкм и от 50 до 100 мкм (для порошка ПГСР-4).

Измерения проводились на экспериментальном стенде для проведения процесса лазерной наплавки, оборудованным иттербиевым волоконным лазером ЛС-4-К, порошковым питателем PF 2/2(Рис. 2 а) и коаксиальным соплом. Мощность лазерного излучения оценивалась с помощью измерителя фирмы Ophir(Рис. 2 б).



а)



б)

Рис. 2. а - порошковый питатель PF 2/2;
б – измеритель мощности фирмы Ophir;

Порошковые материалы транспортируются инертным газом, и сводятся в точку с помощью конического коаксиального сопла (Рис. 3). Для создания защитной атмосферы и транспортировки порошковых частиц в зону обработки используется инертный газ повышенной чистоты – аргон ГОСТ 10157-79.

Защитный газ подается вдоль центральной оси сопла и защищает оптическую систему от частиц порошка и ванну расплава от окисления, а транспортирующий газ доставляет порошок от питателя до зоны лазерной обработки.[1]

На расстоянии 16 мм от среза сопла, где происходит фокусировка газопорошкового потока, установлено устройство сдува порошка в горизонтальном направлении, что связано с защитой измерительного оборудования и не влияет на общую картину (Рис. 3).

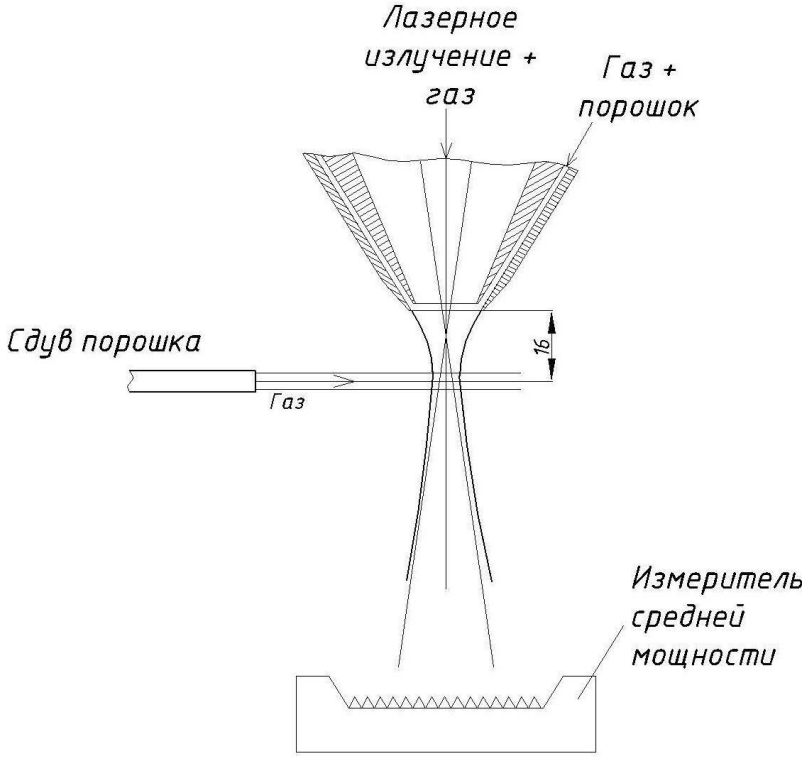


Рис. 3. Схема процесса измерения энергии лазерного излучения.

Перед исследованием порошок просеивался на сите при помощи установки РЛ-1 для получения частиц с диапазонами фракционного состава 60-50 мкм, 50-40 мкм, 40-20 мкм.

Предлагаемый метод измерения основан на следующих допущениях:

1. Тенью между частицами порошка пренебрегаем, т.к. концентрация порошка мала по сравнению с объемом транспортирующего газа.
2. Скорость частиц на вылете из сопла зависит от расхода транспортирущего газа в исследуемом диапазоне линейно, кроме того, от вылета сопла до достижения подложки скорость частиц остается постоянной.[2]
3. Свойства порошковых материалов рассматриваются как независимые от температуры, плотность и размер частиц постоянен.

Исследование различных по форме и размерам порошковых материалов необходимо чтобы установить, какая форма и размер частиц меньше всего взаимодействует с лазерным излучением.

В процессе проведения эксперимента расходы газов зафиксированы (таблица 1).

Таблица 1. Расходы технологических газов во время исследования.

Тип инертного газа	Расход газа, л/мин	
	Несущий газ	Защитный газ
Аргон	10 12 20	5

Для нахождения зависимости мощности лазерного излучения от расхода порошковых частиц и от расхода транспортирующего газа был проведен эксперимент, со следующими изменяемыми параметрами: расходом транспортирующего газа (10-20 л/мин), расходом порошковых частиц (0-20 г/мин с шагом 4 г/мин) и размерами частиц (60-20 мкм) для каждого из исследуемых порошков.

После проведения опытов выполнена статическая обработка результатов. На рисунках 4-7 приведены графики зависимости мощности лазерного излучения от расхода порошковых частиц и от размера частиц для каждого из типов порошков, а также зависимость мощности от формы порошковых частиц.

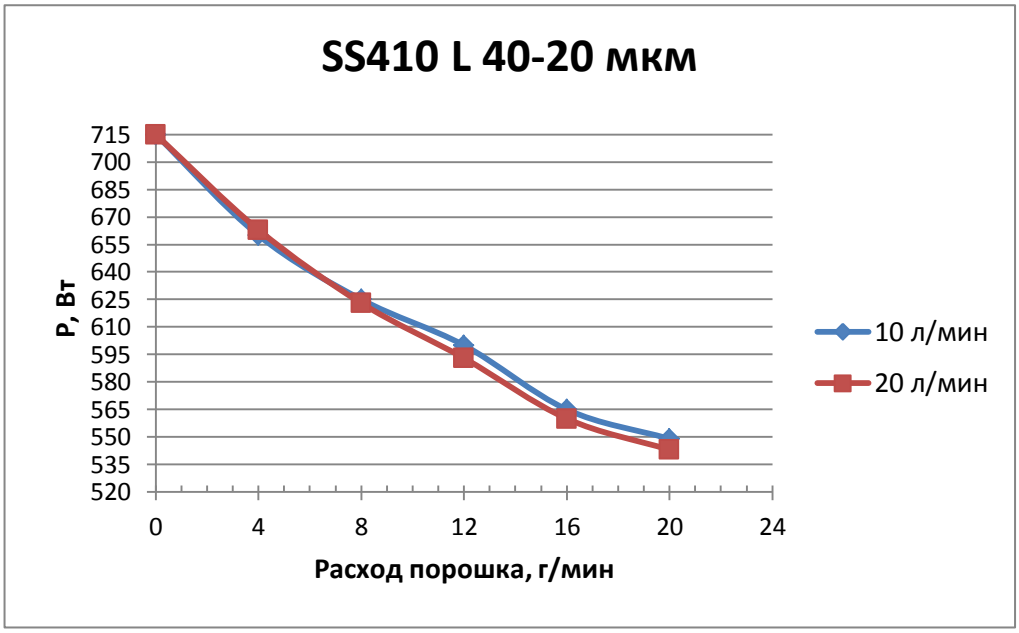


Рис. 4. Зависимость мощности лазерного излучения от расхода порошковых частиц SS410 L 40-20 мкм при различных значениях расхода транспортирующего газа.

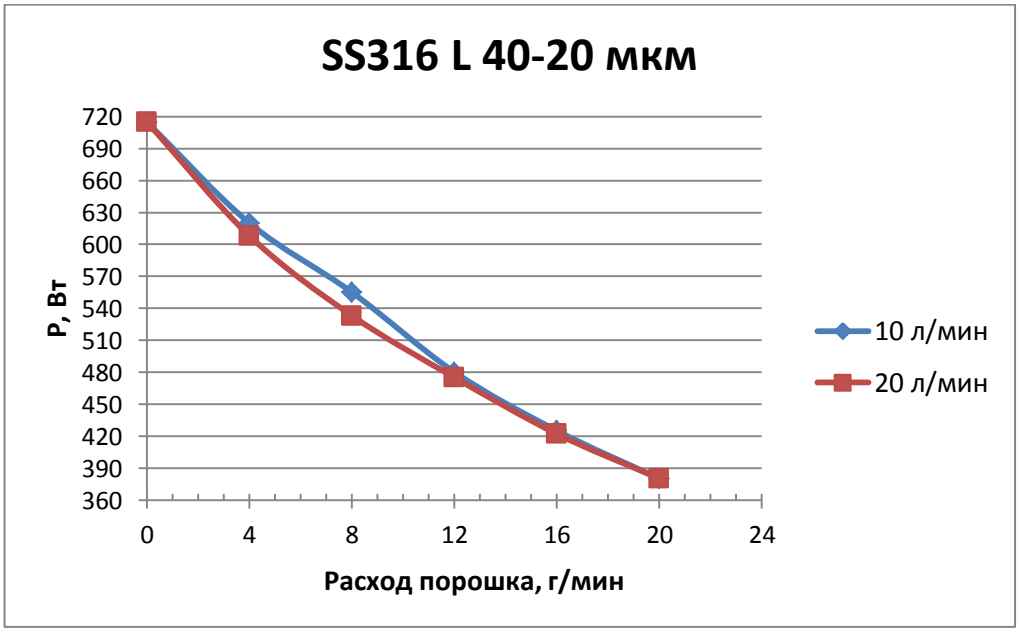


Рис. 5. Зависимость мощности лазерного излучения от расхода порошковых частиц SS316 L 40-20 мкм при различных расходах транспортирующего газа.

Из приведенных графиков видно, что расход транспортирующего газа практически не влияет на рассеивание мощности лазерного излучения, что объясняется постоянным количеством порошковых материалов в зоне взаимодействия лазерный луч-

порошок. Также можно говорить, что сферические частицы порошка SS316 L лучше рассеивают мощность лазерного излучения по сравнению с овальными частицами неправильной формы порошка SS410 L, что объясняется большей площадью поглощения сферических частиц по сравнению с овальными частицами того же размера. Но в работе [3] показано, что использование частиц с формой, близкой к сферической, позволит снизить потери материала, улучшить равномерность подачи порошка и увеличить производительность процесса за счет формирования тонкой перетяжки в области фокусирования и за счет более схожего поведения частиц в потоке газа.

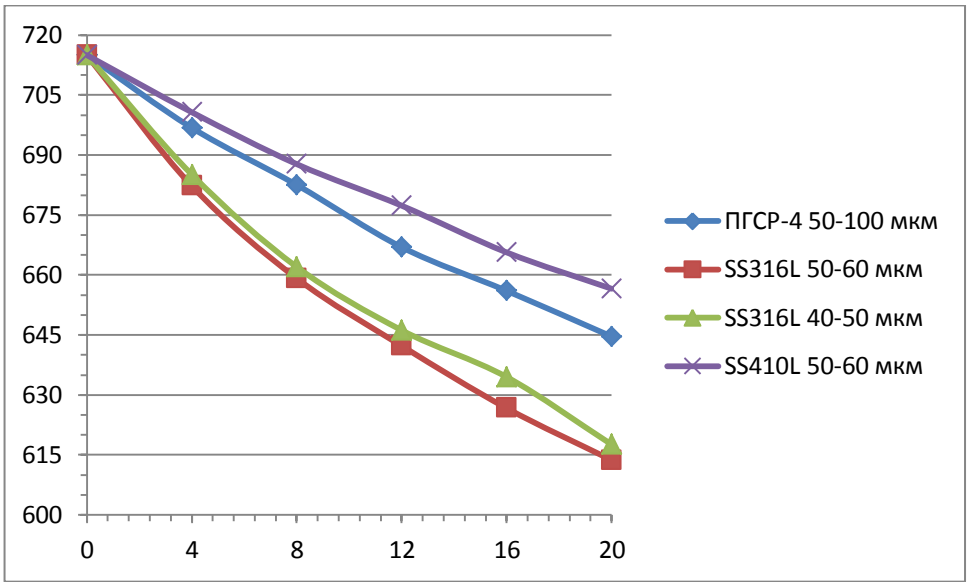


Рис. 6. Зависимость мощности лазерного излучения от расхода порошковых частиц различных размеров для каждого типа порошков.

Существенную роль в рассеивании мощности лазерного излучения играет расход порошковых частиц. Частицы порошка взаимодействуя с лазерным лучом поглощают часть энергии. Чем большее количество частиц взаимодействует с лазерным излучением, тем меньшая мощность доходит до подложки.

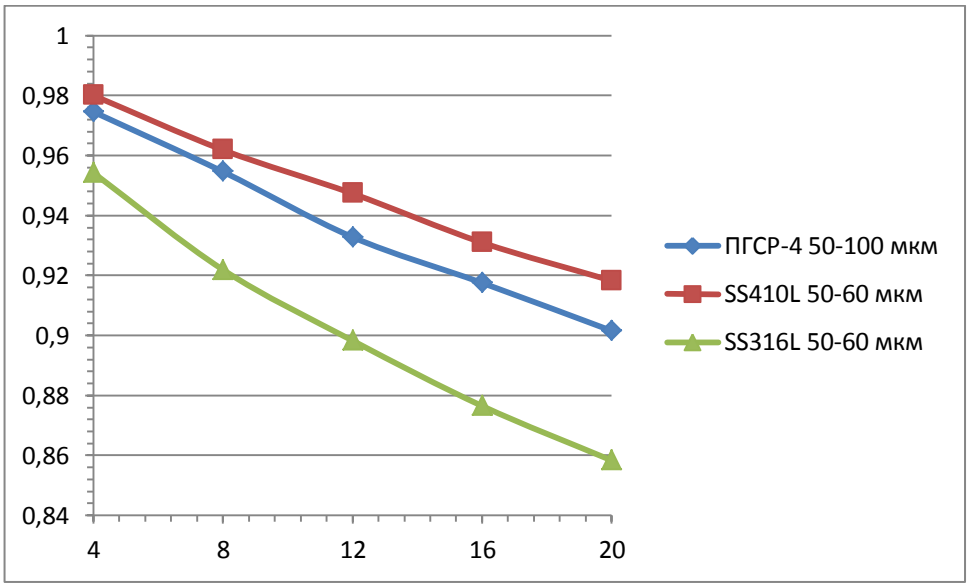


Рис. 7. Зависимость доли мощности лазерного излучения вводимой в подложку от расхода транспортирующего газа при различных размерах порошковых частиц

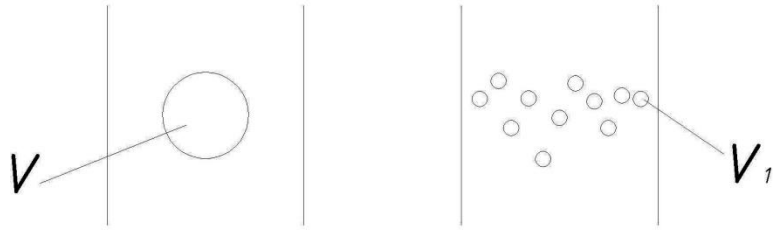


Рис. 8. Схема взаимодействия лазерного излучения с частицами порошка разных размеров при V=V1*N; где N – количество мелких частиц; V, V1 – объем большой и маленьких частиц соответственно.

На рисунках 6-7 заметно, что относительно мелкие частицы сферического порошка лучше рассеивают лазерное излучение, что объясняется большей площадью поглощения по сравнению с частицами того же объёма, но большего размера (Рис. 8).

Проведенные эксперименты показывают, что с увеличением расхода порошка доля излучения, вводимая в подложку, падает прямолинейно расходу в среднем 100 Вт на 7 г порошка.

Экспериментально показано, что с увеличением фракционного состава порошка доля энергии, поглощенная порошком, уменьшается, причем для сферических частиц эта доля в среднем уменьшается на 4%.

Экспериментально доказано, что расход транспортирующего газа практически не оказывает влияние на долю поглощенной энергии частицами, что объясняется постоянным количеством порошковых материалов в зоне взаимодействия лазерный луч-порошок.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 13-08-13126

Литература

1. *Toyserkani E., Khajepour A., Corbin S.* Laser cladding. Boca Raton: CRS Press, 2005. 280 p.
2. *Третьяков Р.С.* Технологические особенности процесса лазерной модификации поверхностей с коаксиальной подачей порошковых материалов. Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014 г.
3. *Новиченко Д. Ю.* Разработка и исследование процесса прямого лазерного изготовления детали из композиционного материала на основе стали и карбида титана. Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011 г.

Секция XIII

Реновационные технологии

Председатель: **Ступников Владимир Петрович**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии обработки материалов» (МТ-13)

Ученый секретарь: **Козлов Анатолий Владимирович**
кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии обработки материалов» (МТ-13)

УДК 631.371

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВТОРИЧНОГО ВАЛА КОРОБКИ ПЕРЕМЕНЫ ПЕРЕДАЧ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

Глеб Юрьевич Бохонов,
студент 4 курса,
кафедра «Технологии обработки материалов»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: С.К. Федоров,
доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии обработки материалов»

Введение

Актуальность работы:

Анализ условий эксплуатации и характерных дефектов автомобильной техники свидетельствует о низком качестве изготавливаемых деталей, прежде всего, по критериям износостойкости и прочности наиболее нагруженных поверхностей. В мастерских автомобилестроительных предприятий, широкая номенклатура изготавливаемых и восстанавливаемых деталей не подвергается термообработке, упрочняющей и отделочно-упрочняющей обработке изнашиваемых поверхностей. Изготовление и качественный ремонт автомобильной техники может быть обеспечен за счет эффективных способов упрочнения и восстановления деталей.

Одним из путей повышения ресурса отремонтированной техники, снижения расхода запасных частей является внедрение в ремонтное производство технологии восстановления наружных цилиндрических поверхностей деталей типа «вал» электромеханической обработкой (ЭМО).

Цель работы:

Теоретически обосновать и исследовать технологию восстановления посадочных мест под подшипники качения деталей типа «вал» электромеханической обработкой.

Задачи исследований:

- исследовать состояние деталей типа «вал», поступающих в ремонт и изучить характерные дефекты рабочих поверхностей;
- изучить основные способы восстановления деталей типа «вал» и обосновать возможность применения технологии электромеханической обработки;

Объект исследования:

Вторичные валы коробки переключения передач автомобилей семейства «Газель».

Основное содержание работы

Анализ характерных дефектов деталей машин показывает, что наиболее часто происходит нарушение посадки в сопряжениях вал-подшипник качения. Для восстановления работоспособности узла применяют различные способы. Выбор рационального способа восстановления деталей определяется по критериям применяемости, долговечности и технико-экономической эффективности [1].

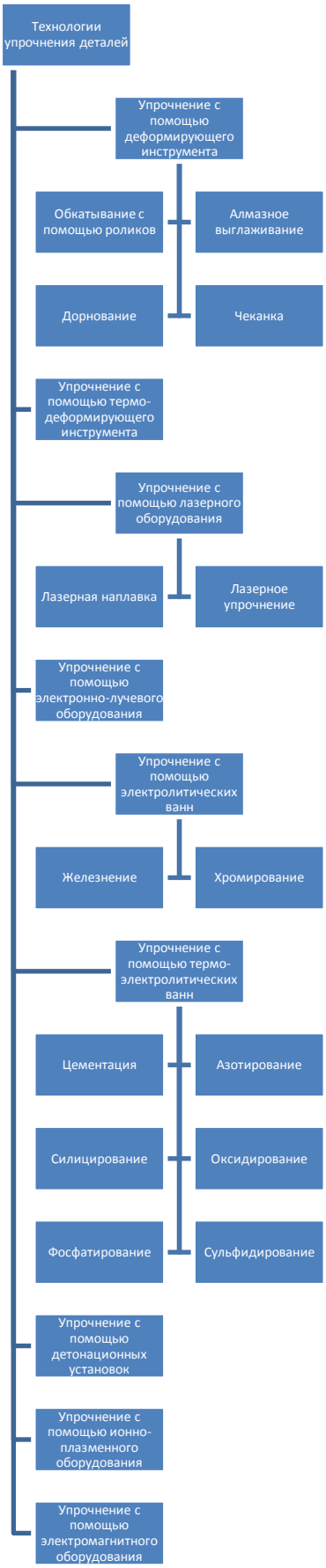


Рис. 1. Существующие технологии упрочнения деталей

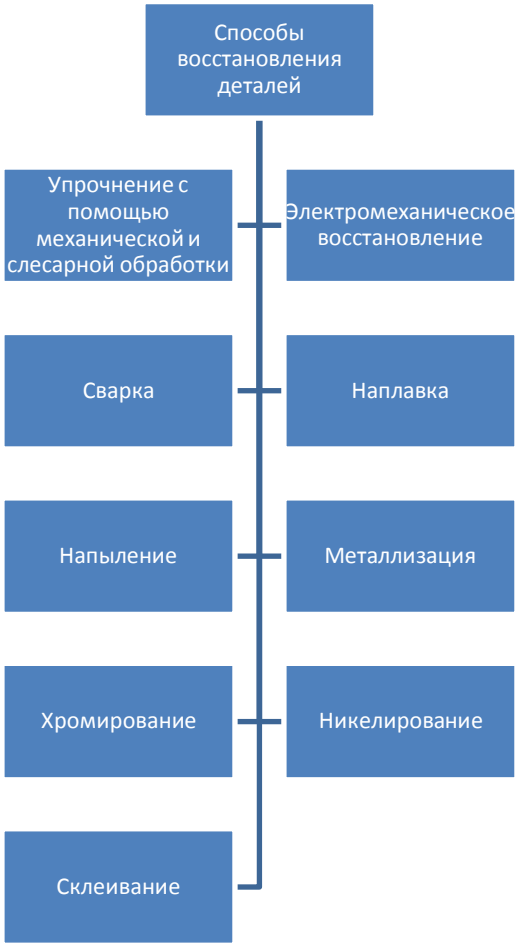


Рис. 2. Существующие технологии восстановления деталей

Существующие технологии изготовления, а тем более восстановления не обеспечивают необходимых физико-механических свойств посадочных мест под подшипники качения. При изготовлении валов твердость посадочных мест валов, в лучшем случае не более HRC 58, тогда как твердость колец подшипника качения HRC 60..62. При восстановлении посадочных мест валов сваркой, наплавкой, накаткой, напылением твердость поверхностей не превышает HRC 26..42.

Одной из деталей с износом по посадочному месту под подшипник качения является вторичный вал коробки перемены передач (КПП) автомобилей семейства «Волга», «Газель» (рис. 3). В связи с износом посадочного места вала по диаметру 30k6, автомобиль останавливают, а КПП отправляют на ремонт. Высокая твердость шейки вала (HRC 56..58), полученная цементацией (нитроцементацией) не позволяет использовать существующие технологии восстановления. Вал выбраковывают и утилизируют.

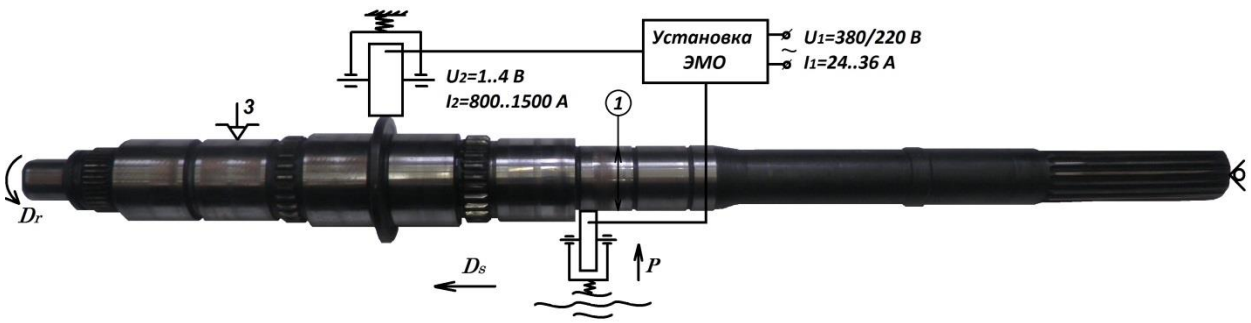


Рис. 3. Принципиальная схема упрочняющего электромеханического восстановления вторичного вала КПП автомобиля семейства «Газель»:

1 – посадочное место под подшипник качения

Электромеханическая обработка - это вид обработки поверхности деталей, основанный на одновременном термическом и механическом воздействии на поверхностный слой обрабатываемой детали. В результате значительно изменяются физико-механические свойства поверхностного слоя, повышается износостойкость и микротвердость [2].

Электромеханическое упрочнение характеризуется следующими особенностями [3]:

1. Тепловое и механическое воздействие на поверхность детали осуществляется одновременно, а не последовательно;

2. Нагрев поверхностного слоя происходит от двух источников: внешнего (теплота трения) и внутреннего (теплота от прохождения электрического тока);

3. Продолжительность нагрева и выдержки, в зависимости от поверхности контакта и скорости обкатки, относительно кратковременная (измеряется сотыми и тысячными долями секунды);

4. Высокая скорость охлаждения определяется интенсивным отводом тепла от тонкого поверхностного слоя в середину холодной детали;

5. Поверхностный слой детали поддается многократному тепловому воздействию, в зависимости от числа проходов.

На кафедре «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана выполнены опытно-экспериментальные работы по обоснованию способа упрочняющего электромеханического восстановления посадочных мест (ПМ) валов под подшипник качения (ПК) для вторичного вала КПП автомобилей семейства «Волга» и «Газель». По согласованию с представителями заказчика (*Е.И. Богацкий, И.А. Калядин*, ЧП Богацкий) в условиях учебно-научно-производственной лаборатории ЭМО деталей им. Б.М. Аскинази произведено восстановление 5 валов. Детали после восстановления переданы представителю заказчика для проведения эксплуатационных испытаний.

Упрочняющему электромеханическому восстановлению подверглось посадочное место вала под подшипник качения диаметром 30k6. Восстановление производилось на токарно-винторезном станке 1В62Г с применением установки ЭМО мод. «Эталон», державки телескопической, токоподводящего устройства, инструментального ролика, и двух медных токоподводящих шин.

Таблица 1. Результаты ЭМО

№ вала	Диаметр вала после износа, мм	Твердость до ЭМО, HRC	Диаметр после ЭМО, мм	Диаметр после шлифования, мм	Твердость после ЭМО, HRC
1	29,95	56-58	30,13	30,012	63
2	29,95	55-61	30,08	30,015	62
3	29,94	52-55	30,11	30,013	62,7
4	29,97	53-57	30,15	30,005	63,2
5	29,95	50-53	30,18	30,015	63,9

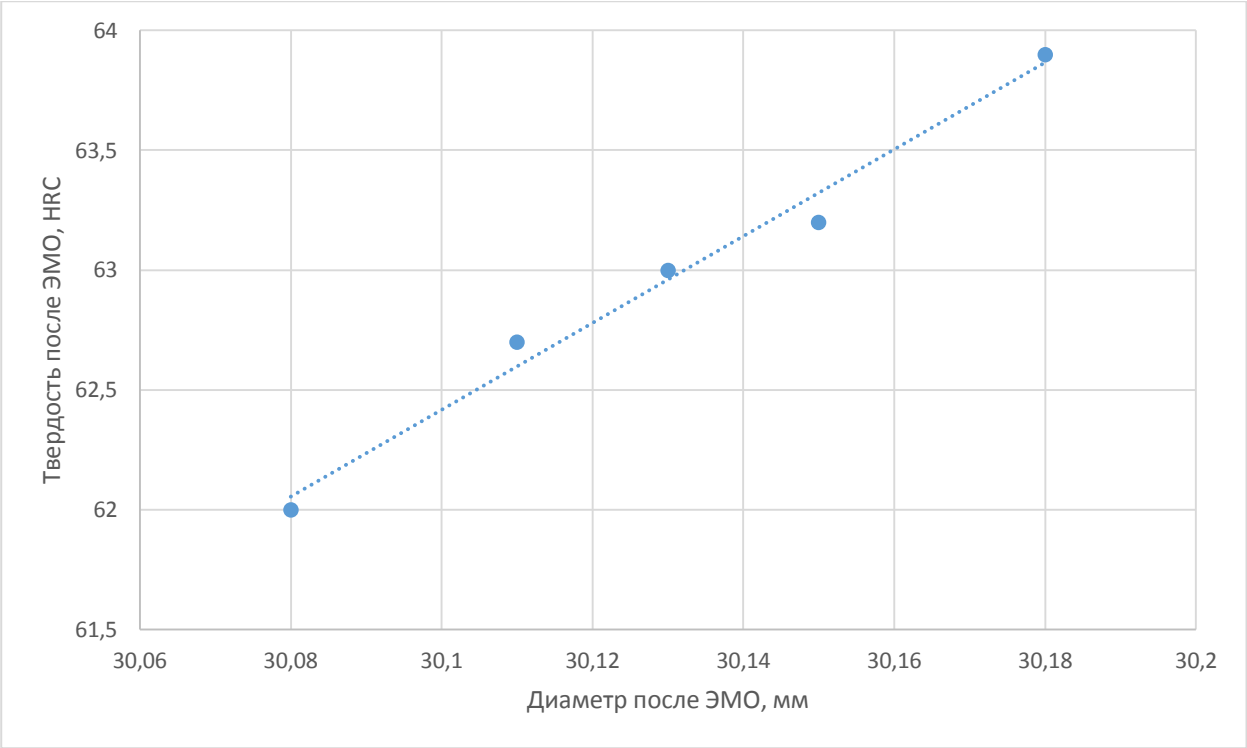


Рис. 4. Изменение размера шейки вала после ЭМО в зависимости от твердости после ЭМО

Экспериментально установлено, что с увеличением диаметра шейки вала после ЭМО увеличивается ее твердость (рис. 4). В свою очередь, для того, чтобы получить наибольший диаметр после ЭМО необходимо использовать максимально допустимую силу тока.

Восстановление основано на электроконтактном нагреве и быстром охлаждении шейки вала путем обкатывания инструментальным роликом. Электроконтактный нагрев основан на использовании электрической энергии промышленной частоты (50 Гц) при силе электрического тока во вторичной цепи 1400..1800 А при напряжении вторичной цепи 2,5..3 В.

За истекшие 8 месяцев эксплуатации экспериментальных валов отказов КПП не зафиксировано. КПП с экспериментальными валами продолжают использовать в автомобилях «Газель» в условиях г. Москвы для перевозки пассажиров и грузов.

Теоретические и экспериментальные исследования, выполненные в области ЭМО [2, 4], а также в области низкотемпературного поверхностного пластического деформирования [5] позволили использовать разработки при упрочняющем электромеханическом восстановлении посадочных мест под подшипники качения.

Выводы

1. Изучение физических и технологических особенностей способов восстановления посадочных мест вала под подшипники качения позволило установить, что существующие методы не обеспечивают необходимой прочности и износостойкости вала, а также неприемлемы для деталей имеющих высокую твердость поверхности.

2. Упрочняющее электромеханическое восстановление посадочных мест вала позволяет увеличить диаметр до 0,2 мм и добиться более высоких показателей износостойкости и прочности детали, при меньшей трудоемкости, в сравнении с наиболее распространёнными на данный момент способами.

3. Эксплуатационные испытания деталей, подвергнутых ЭМО, показали высокую эффективность способов при низкой себестоимости выполнения работ.

Литература

1. *Навознов А.Н.* Обоснование и разработка технологии восстановления деталей газопламенным напылением порошковых металлов с применением электромеханической обработки. Автореферат, 1995 - 16 с.
2. *Аскинази Б.М.* Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой. – М.: Машиностроение, 1989. – 200 с.
3. *Суслов А.Г.* Качество поверхностного слоя деталей машин. - М.: Машиностроение, 2000, с. 320.
4. *Федоров С.К., Федорова Л.В.* Электромеханическая обработка. РИТМ – 2012 - №2 (70), с. 14-16.
5. *Лавров А.А., Паникратов С.Ю.* Технологические возможности процесса низкотемпературного поверхностного пластического деформирования. Машиностроитель, №11-12, 1998, с. 53-54.

УДК 621.791.927.5

ВОССТАНОВЛЕНИЕ НАПРАВЛЯЮЩЕЙ ПОЛЗУНА ПРЕССА ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКОЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФЕРРОМАГНИТНОЙ ШИХТЫ.

Алексей Валерьевич Кирейнов,
студент 6 курса,
кафедра «Технологии обработки материалов»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: С.Н.Глазунов,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии обработки материалов»

Поступательные направляющие скольжения широко применяются в различных машинах для перемещения ползунов, столов, суппортов и других узлов, а также в кулисных, кулачковых и других механизмах. Они являются типичными представителями сопряжений с переменными условиями контакта, для них характерен неравномерный износ поверхностей трения.

Во многих случаях к направляющим предъявляются высокие требования по обеспечению точности перемещения ползуна и износостойкости поверхностей трения. В процессе эксплуатации прессов происходит износ направляющих ползунов и образование на них рисок, царапин, задиров.

Основной критерий работоспособности направляющих – их износостойкость. Они должны длительное время сохранять полученную при изготовлении точность. На износостойкость направляющих воздействует множество различных факторов, главные из которых таковы: материал и термообработка направляющих станины и подвижного рабочего органа; распределение давления по граням и на длине направляющих; условия работы (смазка, загрязненность), характер перемещения рабочего органа (скорость, величина хода).

Характерные дефекты станин и направляющих: износ направляющих поверхностей и посадочных отверстий, откалывание выступающих частей, пробоины, трещины, сколы, царапины, задиры.

Настоящая работа посвящена исследованию процесса электродуговой наплавки направляющей ползуна пресса из серого чугуна с применением ферромагнитной шихты.

Восстановление деталей машин из чугуна способами электродуговой наплавки связано со следующими трудностями: возникновение горячих и холодных трещин, обусловленное повышенным содержанием углерода, серы и фосфора; высокая

жидкотекучесть чугуна; повышенная склонность к порообразованию; отбеливание чугуна, что делает невозможным последующую механическую обработку; возникновение значительных сварочных напряжений, связанных с нагревом металла.

Ферромагнитная шихта для дуговой наплавки деталей машин, изготовленных из чугуна, может быть использована при автоматической сварке и наплавке. Наплавку ведут непрерывной электродной проволокой, на которую подается магнитная шихта, и под действием собственного магнитного поля сварочной цепи притягивается к ней, образуя покрытие, аналогичное электродному. Для обеспечения притягивания шихты к электродной проволоке в состав шихты вводятся ферромагнитные компоненты.

Восстановление деталей методом электродуговой наплавки с применением ферромагнитной шихты – сложный организационно-технологический процесс, при котором в отличие от производства новых деталей в качестве заготовки используют изношенную, но уже сформированную деталь. В этом случае затраты на выполнение таких операций, как литье, ковка, штамповка и т.п. отсутствуют.

Процессы сварки или наплавки всегда связаны с возникновением сварочных деформаций и напряжений в деталях (конструкциях), подвергающихся термическому воздействию. Величина зоны высоких сварочных напряжений и уровень деформации определяется количеством локальной энергии, вводимой в единицу времени или объемом наплавленного металла и шириной зоны разогрева до температур, где металл претерпевает структурные превращения, вследствие чего металлы, имеющие высокую прочность, при сварке или наплавке склонны к образованию горячих и холодных трещин.

Рассматриваемый способ позволяет подобрать такой состав шихты и режимы наплавки, которые обеспечивают стабильное горение дуги при относительно небольших значениях тока (минимальная погонная энергия) и получение бездефектного слоя с небольшими напряжениями и деформациями, отвечающего необходимым эксплуатационным требованиям без дополнительной термообработки.

Данная работа содержит в результаты экспериментов, проведение которых позволило максимально приблизиться к реальным условиям процесса восстановления. Основной задачей экспериментов было, во-первых, ознакомление с технологией восстановления, во-вторых, выявление влияния различных параметров процесса на сам процесс восстановления, на характеристики наплавленного слоя и основного металла. Важной задачей экспериментов было получение необходимой твердости и структуры в наплавленном слое.

В качестве оборудования для наплавки направляющих использовалась имеющаяся на кафедре МТ13 МГТУ им. Баумана установка УД 209, позволяющая производить наплавку под слоем флюса, в среде защитных газов или с использованием ферромагнитной шихты деталей вращения диаметром от 10 до 400 мм. Общий вид УД 209 показан на рисунке 1. Установка дает возможность наплавлять цилиндрические поверхности, заваривать шлицы, шпоночные канавки, резьбу. При наплавке применяется наплавочная проволока диаметром от 0,8 до 2,0 мм. Скоростью подачи проволоки до 350 м/ч.

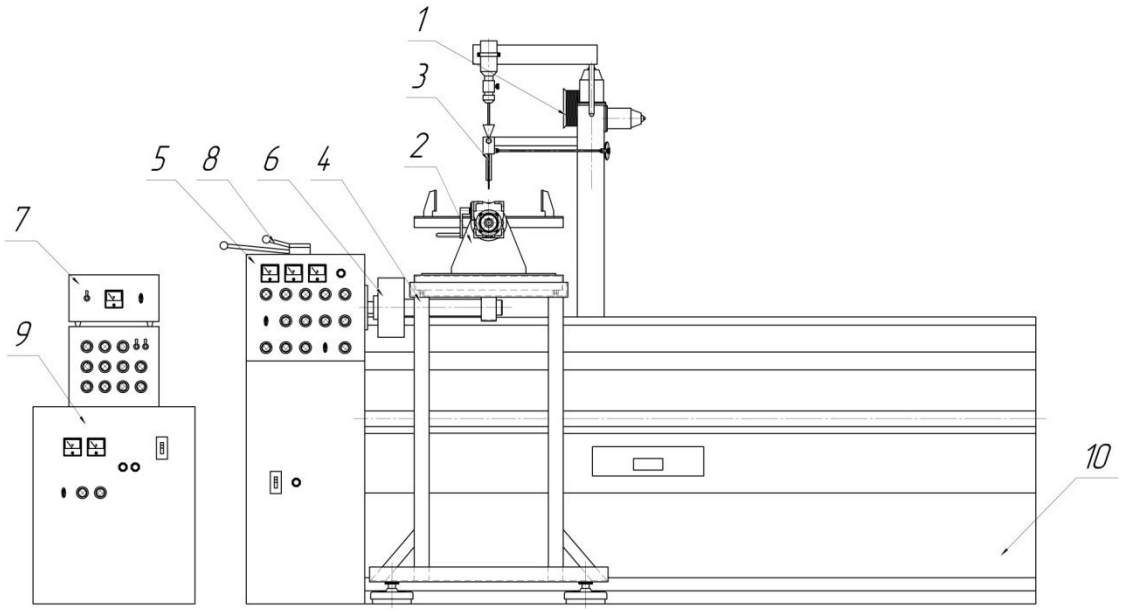


Рис.1. Общий вид установки УД209.

Наплавочная установка состоит из станины 10, передней бабки 5 со шпинделем 6, наплавочной головки 3 с бухтой с проволокой 1, пульта управления 7, сварочного выпрямителя 9, оснастки 2, 4.

В результате экспериментов были получены данные, позволившие составить сравнительную характеристику наплавочных материалов и наплавленных слоев. Для эксперимента была осуществлена наплавка на плоские образцы (рис. 2, 3) из серого чугуна марки СЧ-30. Была получена наплавка шириной 12 мм длиной 80 мм .


Рис. 2. Наплавленный образец.

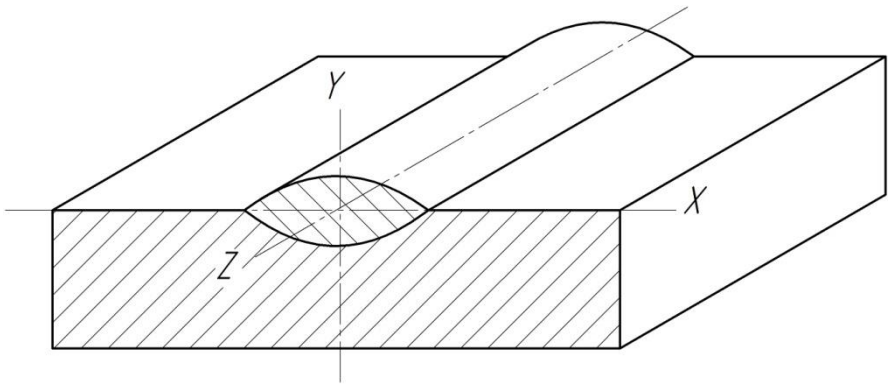


Рис. 3. Схематическое изображение наплавленного образца.

Для наплавки использовалась шихта, состав которой указан в таблице 1.

Таблица 1. Состав шихты

№	Fe, %	C, %	SiCa, %	FeTi, %	CaF2, %	CaCO3, %
1.	50	15	15	4	8	8
2.	55	10	20	5	10	10
3.	31	30	15	-	12	12

Далее определялась твердость поверхности наплавленного слоя с шагом 10 мм на твердомере ТКС-1М со шкалой HRC. Полученные данные по твердости приведены в таблице 2.

Таблица 2. Твердость наплавленного слоя

№ образца	Твердость, HRC									
1	18	23	22	16	21	22	19	24	17	20
2	27	31	32	25	30	31	26	23	30	22
3	31	29	34	33	30	35	29	27	32	25

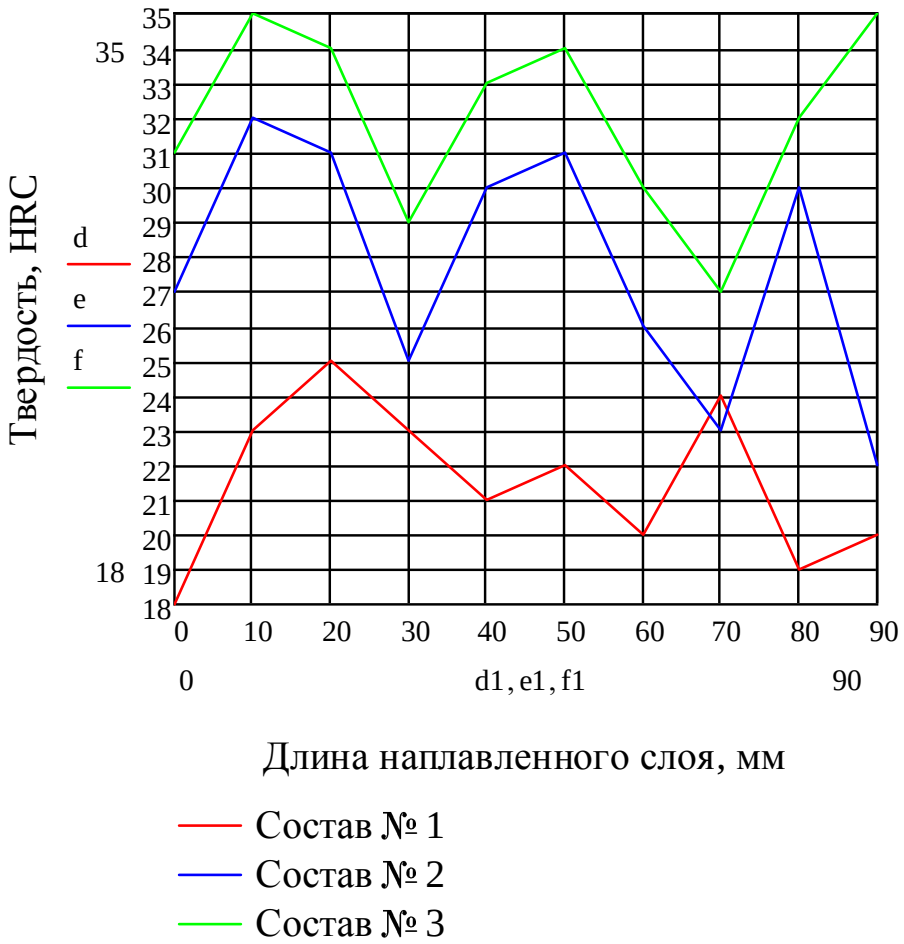


Рис. 3. График изменения твердости на поверхности наплавленного слоя.

На следующем этапе сделан образец, на котором произведено 10 измерений твердости с шагом 2 мм, как показано на рисунке 4.

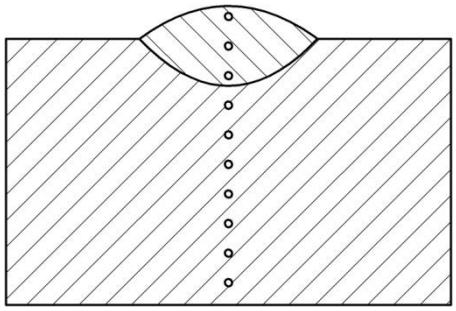


Рис. 4. Схема измерения твердости образца.

Полученные значения твердости приведены в таблице 3:

Таблица 3. Твердость образца и наплавленного слоя.

№ образца	Твердость, HRC									
1	19	20	21	20	21	21	23	25	22	24
2	19	19	21	20	19	22	25	30	28	31
3	20	21	19	19	20	24	27	32	34	35

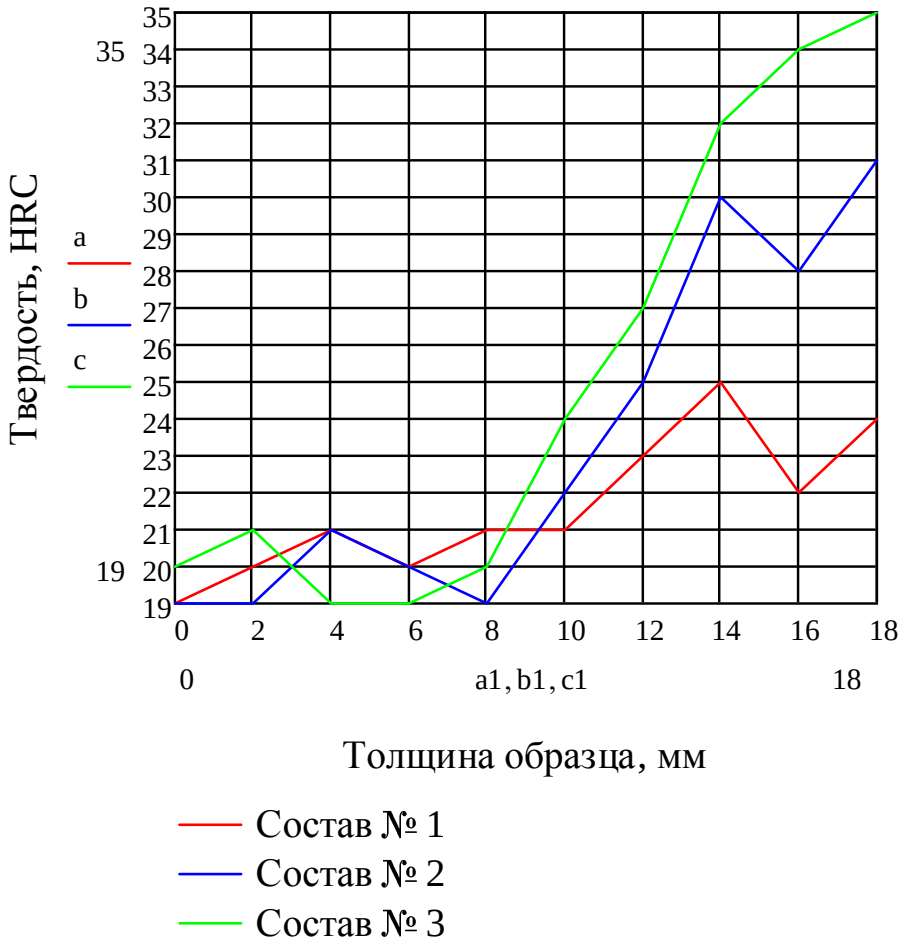


Рис. 5. График изменения твердости образца и наплавленного слоя.

По результатам видно, что твердость существенно изменяется от состава шихты. Более низкая твердость имеет образец №3, что можно объяснить отсутствием в составе ферротитана. А высокая твердость образца №2 по сравнению с образцом №1 обусловлена повышенным содержанием кремния, так как этот элемент повышает углеродный эквивалент. Состав №1 обеспечил твердость, которую должна иметь направляющая пресса.

Литература

1. *Глазунов С.Н., Гаврилюк В.С., Вялков В.Г., Овешников А.В.* Технология восстановления стальных и чугунных деталей транспортных машин методом электродуговой наплавки с применением ферромагнитной шихты // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2002. – № 6. С. 3–5.
2. Ферромагнитная шихта для дуговой наплавки деталей машин, изготовленных из железоуглеродистых сплавов: пат. 2448823 Российская Федерация: МПК B23K 35/36 / Глазунов С.Н. и др.; заявитель и патентообладатель Апраксин Д.В. – № 2010104100/02; заявл. 09.02.2010; опубл. 27.04.2012, Бюл. № 12. – 7 с.
3. *Глазунов С.Н.* Курс лекций: Технологические процессы реновации. – М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009 г., 99с.
4. *Апраксин Д.В., Варламова Л.Д., Вялков В.Г., Глазунов С.Н., Слинко Д.Б.* Методические указания к лабораторным работам по дисциплине технологические процессы

УДК 621.785.545

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

Максим Валерьевич Власов,
студент 5 курса,
кафедра «Технологии обработки материалов»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: С.К. Федоров,
доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии обработки материалов»

Современные тенденции в производстве и эксплуатации машин и механизмов направлены на существенное улучшение их эксплуатационных показателей, в первую очередь за счет повышения качества рабочих поверхностей деталей. В частности к основному качественному показателю относится физико-механическое состояние поверхностного слоя, которое направленно формируется на финишных операциях технологического процесса. Действующие и перспективные технологические процессы обработки должны обеспечивать повышение надежности и долговечности как вновь изготавливаемых машин, так отдельных их деталей на стадии ремонта.

В конструкциях машин и механизмов различного назначения большое распространение получили гладкие цилиндрические подвижные сопряжения. Анализ износа таких деталей показал, что значительное большинство выходит из строя, имея низкие эксплуатационные свойства исполнительных опорных поверхностей [1].

С целью снижения интенсивности изнашивания опорной поверхности данных деталей, разработана технология электромеханической поверхностной закалки (ЭМПЗ) (рис. 1) [2, 3]. Для подтверждения эффективности предлагаемой технологии были проведены экспериментальные исследования.

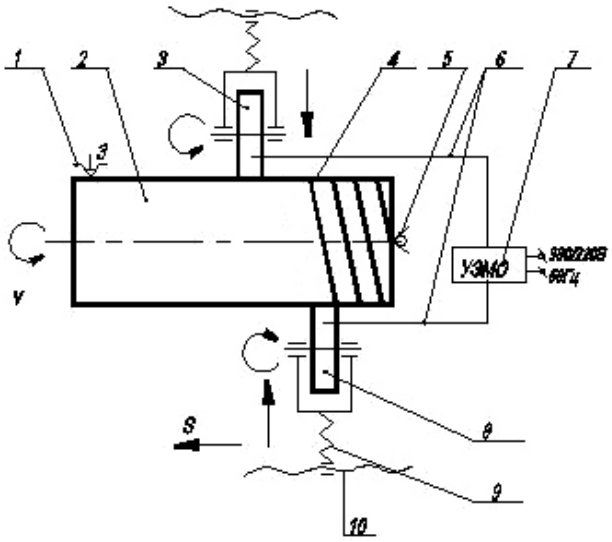


Рис. 1. Схема процесса электромеханической поверхностной закалки цилиндрических поверхностей: 1 –трехкулачковый самоцентрирующий патрон; 2 – образец; 3 – ролик токоподводящий; 4 – обработанная поверхность; 5 – патрон вращающийся; 6 – кабели токоподводящие; 7 – установка электромеханической обработки; 8 –инструментальный ролик; 9 – державка телескопическая; 10 – ходовой винт станка.

Исследования распределения твердости по глубине закаленного сегментного участка поверхности отверстия полученного ЭМПЗ показали, что глубина закаленного слоя составила 0,8 мм твердостью 72 кг/мм^2.

Сравнительные испытания износостойкости обработанной поверхности образцов проводили на машине трения 2070 СМТ-1 по стандартной методике в соответствии с ГОСТ 23.224-86 по схеме «ролик-колодка» (рис. 2).

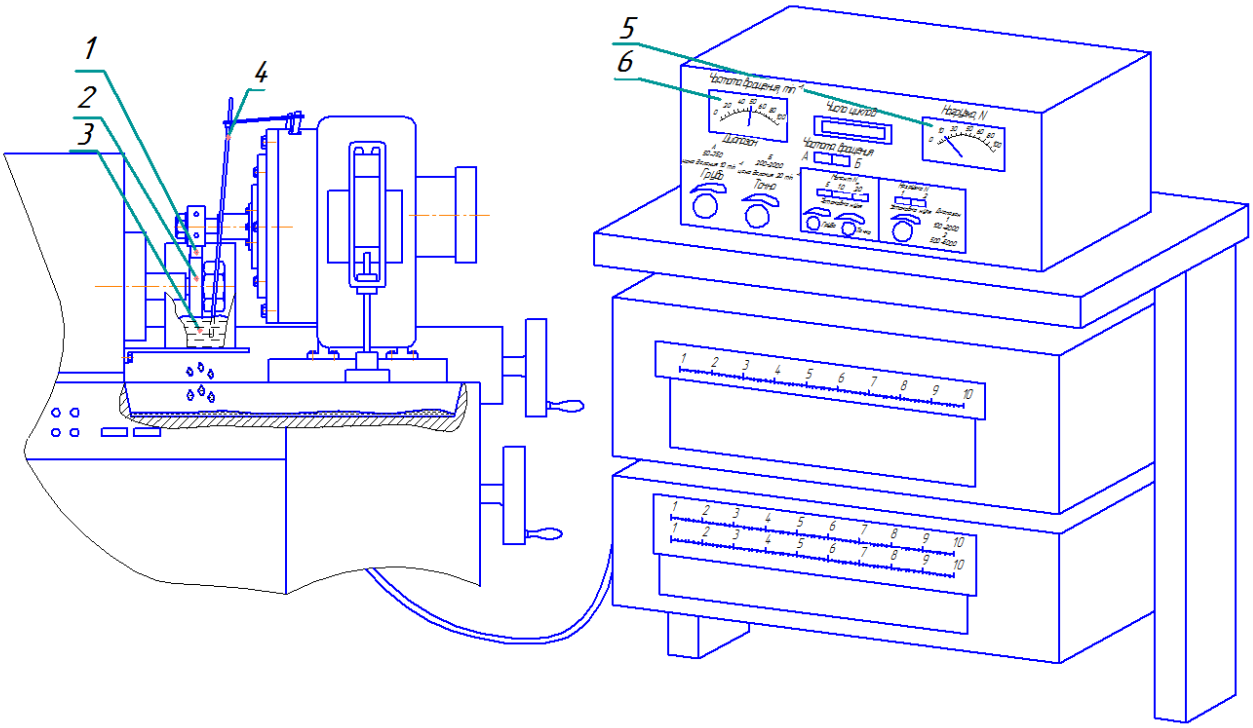


Рис. 2. Общий вид износных испытаний на машине трения 2070 СМТ-1.
1 – колодка; 2 – ролик; 3 – масло с абразивами М-8-В$_2$; 4 – термометр;
5 – датчик частоты вращения ролика; 6 – датчик нагрузки колодки на ролик;

Ролик устанавливается на нижний шпиндель и закрепляется гайкой. Колодка при испытании удерживается с помощью шарика установленного в гнезде, что позволяло ей самоустанавливаться относительно ролика. Такое крепление обеспечивает хорошую воспроизводимость результатов при повторных опытах.

Биение испытываемых поверхностей относительно посадочного отверстия не превышало 0,02 мм. Испытание проводили при частоте вращения n = 500 об/мин, нагрузке 350 Н в зону трения подавалась смазка с абразивами «М-8-$В_2$».

При проведении износных испытаний измерялась температура масла, также производилась запись величины момента сил трения каждые 5-10 минут в течение часа.



Рис. 3. Образец для износных испытаний «ролик-колодка».

Проводились испытания над образцами с поверхностным упрочнением и сырых образцов (базовое сопряжение).

Результаты замеров момента трения приведены на рис. 4. Каждое из приведенных значений является средним для четырех измерений.

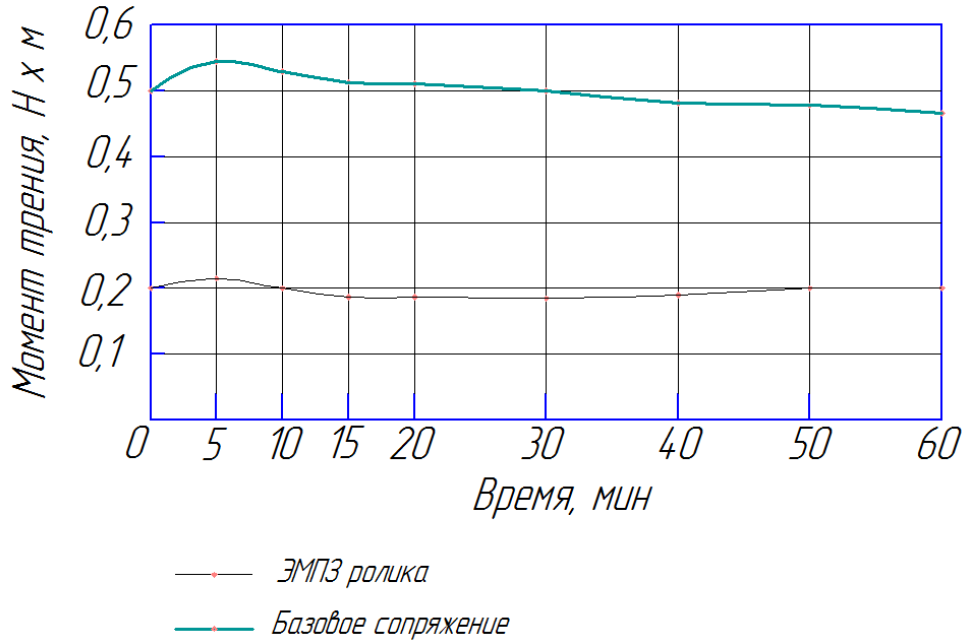


Рис. 4. - Изменение момента трения образцов при испытании в масле с абразивами М-8-$В_2$.

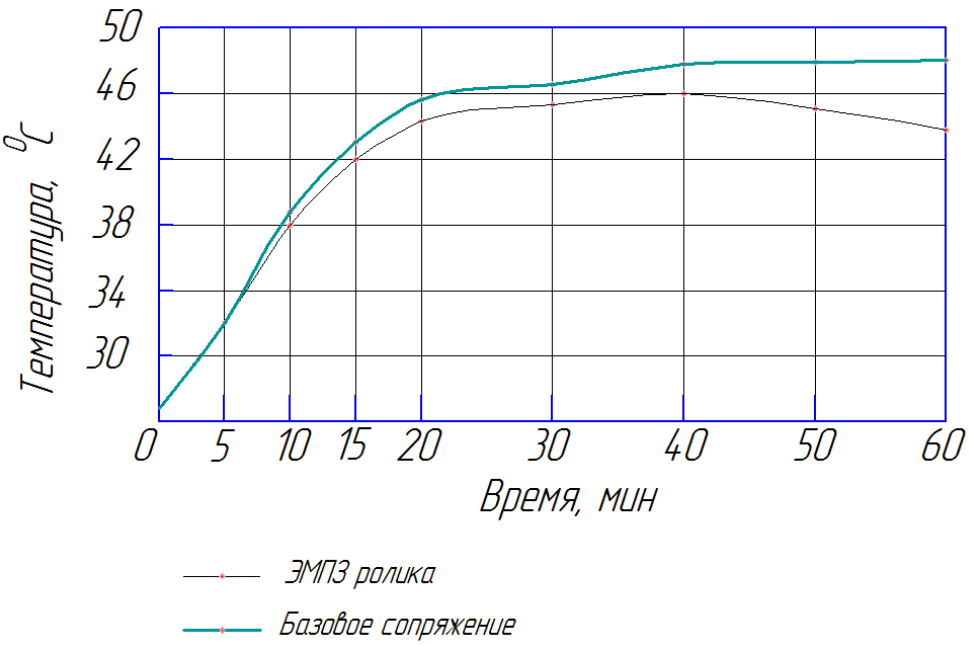


Рис. 5. - Изменение температуры колодок за время испытаний в масле с абразивами М-8-$В_2$.

В период испытаний (рис. 4 и 5) температура масла и момент трения базового сопряжения имеет большее значение по сравнению с экспериментальными образцами.

После износных испытаний образцы, промывали в ацетоне, сушили в течение 30 минут при комнатной температуре и взвешивали. База износных испытаний для каждой пары образцов – 1 час.

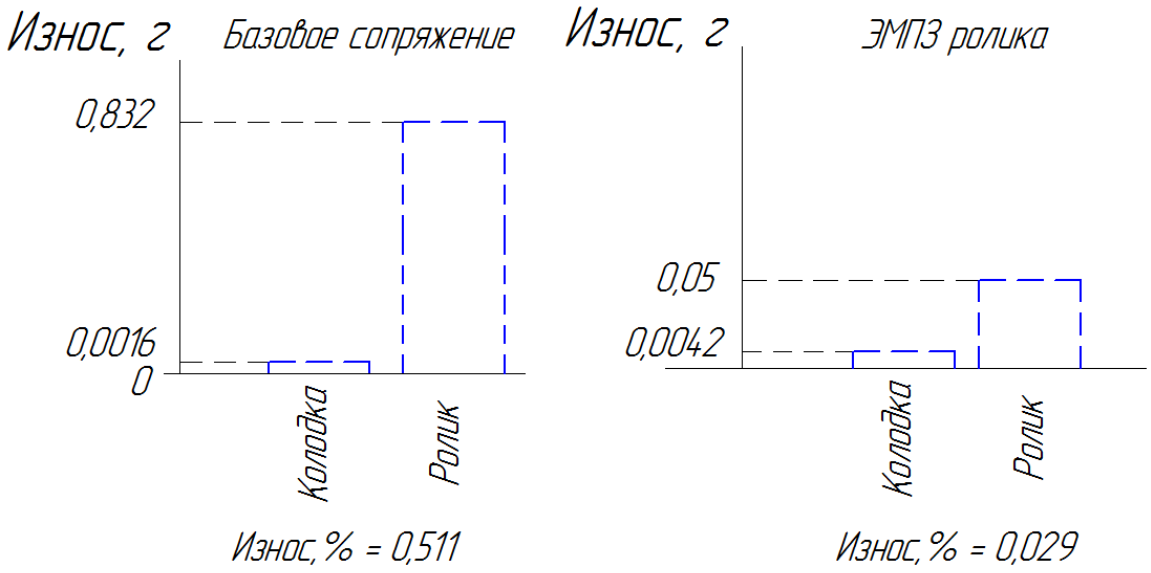


Рис. 6 – Сравнительные результаты износостойкости образцов

Величину износа определяли взвешиванием на аналитических весах ВЛ-Э134 с точностью до 0,00005 г (рис. 7).



Рис. 7. Весы аналитические ВЛ-Э134

Исследования износостойкости показали, что ролики, обработанные ЭМПЗ, имеют относительную износостойкость на 68% выше по сравнению с базовыми парами трения (рис. 5). К тому же суммарный износ базового сопряжения на 60,7% выше износа сопряжения, ролика которого обработана ЭМПЗ.

В результате исследования шероховатости обработанной ЭМПЗ поверхности (рис. 8) выявлено, что первоначальная шероховатость незначительно больше, чем шероховатость поверхности после износных испытаний.

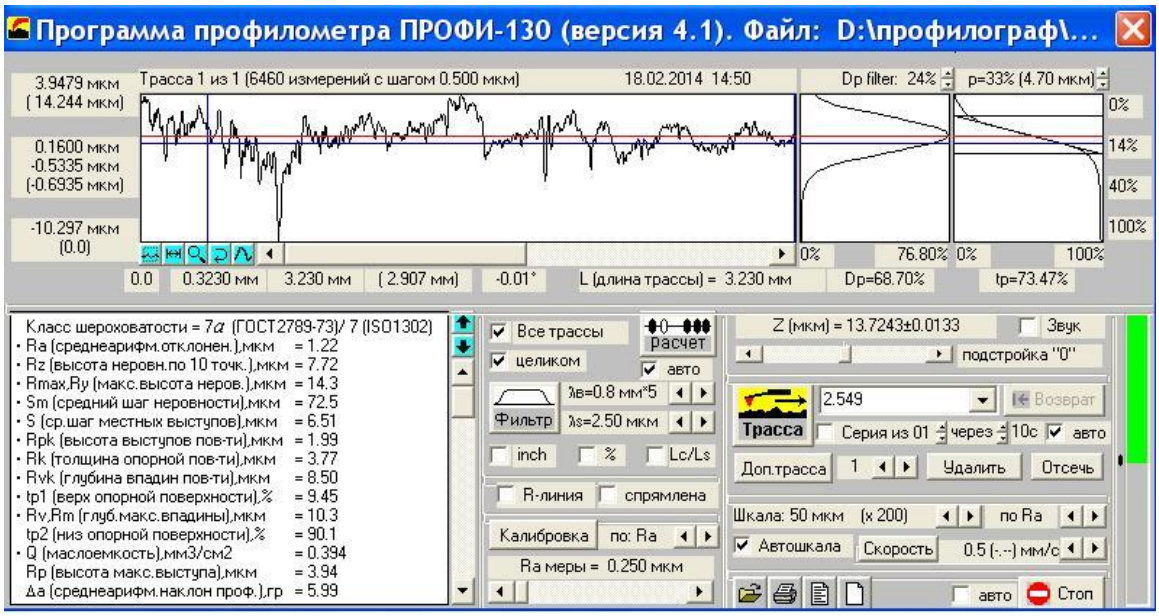


Рис. 8 – Фрагмент профилограммы поверхности ролика

Из проведенных исследований следует, что ЭМПЗ повышает износостойкость поверхностей деталей и увеличить межремонтный ресурс сопряжения. Глубина закалки составляет до 1,5 мм, а на поверхностях деталей формируется мелкозернистая структура. Достоинством данной технологии является экологическая чистота, электробезопасность процессов и возможность финишной обработки закаленных поверхностей твердым точением без переустановки детали.

Литература

1. Федоров С.К., Федорова Л.В. Электромеханическая обработка. РИТМ – 2012 – №2(70), с. 14 – 16.
2. Федорова Л.В., Морозов А.В., Фрилинг В.А. Повышение эффективности электромеханической закалки отверстий гладких цилиндрических подвижных сопряжений испытывающие одностороннюю радиальную нагрузку // Ремонт восстановление модернизация. №2 2012 г.

3. J. S. Alekseeva, L.V. Fedorova, S.K. Fedorov, I.N. Kapustin. Improving the quality of the surface layer of steel parts. Proceeding of 5-th International Mechanical Engineering Forum (IMEF) - 2012- Prague, Czech Republic, c. 65 – 74.

УДК 621.791.927.5

ВОССТАНОВЛЕНИЕ КРАНОВЫХ КОЛЕС ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКОЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФЕРРОМАГНИТНОЙ ШИХТЫ

Павел Васильевич Лужных,
студент 6 курса,
кафедра «Технологии обработки материалов»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: С.Н. Глазунов,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии обработки материалов»

В настоящее время возрастает актуальность к использованию восстановленных деталей при ремонте автомобильной, сельскохозяйственной техники и промышленного оборудования. Главной задачей реновации является восстановление рабочего ресурса изделия и повышения качества поверхности для дальнейшего использования.

В материально-техническом производстве, на данный момент, значительная роль отводится подъемно-транспортному машиностроению, перед которым стоит задача широкого внедрения во всех областях хозяйствования комплексной механизации и автоматизации производственных процессов при выполнении основных и вспомогательных операций, как основы повышения эффективности производства.

Технологический процесс любого производства связан с перемещением огромного количества грузов, от сырья до готовой продукции. На 1 тонну готовой продукции требуется 10...100 тонн сырья, которое транспортируется и складируется различными видами подъемно-транспортной техники.

На металлургических и машиностроительных заводах ПТМ включены в основную цепь технологического процесса, как основное оборудование, обеспечивающее механизацию и автоматизацию технологических операций и ремонтные работы. Например, современный металлургический завод, производящий 5,5 - 6 млн. тонн стали в год потребляет 30 млн. тонн различных материалов. За этот период между цехами перевозят около 60 - 70 млн. тонн различных грузов, на площади в 600 га. Внутри цехов количество транспортируемых материалов в 3 - 4 раза больше.

Для этого цеха металлургических заводов оснащают нормальными и специальными мостовыми и полукозловыми кранами. Специальные технологические краны служат для подъема и перемещения определенных грузов: (слитков, рельсов, сортового проката, листового металла, труб, ковшей с жидким металлом, скрапа, сыпучих тел) или для выполнения специальных операций (подъем копра, завалка шихты в сталеплавильные печи, раздевание слитков, открывание и закрывание крышек нагревательных колодцев).

В восьмидесятые годы общее производство кранов в СССР составляло 6…7 тысяч в год, а после 2000 года стабилизировалось на уровне 1,0…1,5 тысяч в год. Несмотря на ограничения, оговоренные в ГОСТ 28448-90 «Краны консольные электрические передвижные. Типы» и ГОСТ 28648-90 «Колёса крановые. Технические условия», количество типов кранов и разновидностей технических решений их узлов, особенно колёс, насчитывает сотни наименований. При этом каждый краностроительный завод работает по нормам собственной разработки.

Унифицировать детали и узлы кранов до настоящего времени не удалось, поэтому каждое предприятие, эксплуатирующее краны, решает проблему запасных частей самостоятельно, в основном, восстанавливая изношенные поверхности наплавкой или изготавливая новые колёса силами ремонтных служб. Как правило, реборды подвергаются ремонту наплавкой 4 раза, а поверхности катания дважды, что ограничивается появлением циклических трещин в металле колёс.

Срок службы рельсового пути сокращается в результате несоответствия твёрдости дорожки катания и реборд крановых колёс по сравнению с твёрдостью подкрановых рельсов, что необходимо учесть в процессе восстановления колеса. В результате неравномерности приложенной нагрузки (консольное нагружение) и износа колёс появляется значительная разница в диаметрах колёс на рельсовом пути, что приводит к перекосам крана и интенсивному износу реборд колёс и боковых граней рельсов, поэтому желательно восстанавливать весь комплект колес. Очень существенное влияние на износ подкранового пути и реборд колёс оказывает монтажный перекос ходовых колёс относительно друг друга и рельсов.

В процессе движения крана реборды колес подвергаются значительному износу. Скорость износа реборд крановых колес зависит от величины сил трения, возникающих в месте контакта реборды колеса с головкой рельса. Колесо из-за знакопеременных кратковременных нагрузок подвергается быстрому усталостному износу.

По данным Справочника по кранам срок службы реборд крановых колес может составлять от нескольких лет до нескольких месяцев. На долговечность реборд влияют твердость поверхности, точность установки. Высокая твердость реборд повышает срок службы колеса до его ремонта или замены, однако приводит к интенсивному износу головки подкранового рельса. Среди факторов, определяющих износ, основная роль принадлежит химическому составу, упрочняющей (в первую очередь, термической) обработке и формируемым ими структуре и физико-механическим свойствам поверхностных слоев металлов и сплавов.

К числу свойств материалов, оказывающих значительное влияние на износостойкость, в первую очередь относятся сопротивление сжатию, изгибу, сдвигу, силы молекулярного сцепления, твердость, вязкость, устойчивость механических свойств против воздействия высоких температур и давлений.

Механические свойства материалов определяют фактическую площадь касания и через нее влияют на интенсивность износа. При соприкосновении двух поверхностей их контакт происходит главным образом по вершинам неровностей, причем фактическая площадь контакта очень мала. Поэтому даже при небольшой нагрузке местные давления на площадках фактического контакта достигают высоких значений и вызывают пластическое течение металла. Пластическая деформация продолжается до тех пор, пока площадь контакта не окажется достаточной для данной нагрузки. Таким образом, в процессе износа может наблюдаться увеличение фактической площади контакта и повышение микротвердости поверхностных слоев металла.

Предсказать износостойкость металлов только на основании исследования их механических свойств удается далеко не во всех случаях.

Кроме того, следует иметь в виду, что установить предел прочности, предел текучести, а также пластические и динамические свойства поверхностных слоев весьма сложно, поэтому в большинстве случаев исследовалась только зависимость износостойкости металла от твердости.

Относительную износостойкость обычно рассматривают как характеристику прочности материала, приведенного в состояние наклепа. Этот параметр характеризует механические свойства поверхностного слоя изделия и служит для оценки износостойкости при абразивном износе. Если твердость абразивных зерен значительно выше, чем твердость изнашиваемой стали, то износ зависит от разницы твердостей абразива и стали. Если твердость стали ниже твердости абразивных зерен, но приближается к

ней, то при уменьшении этой разницы наблюдается уменьшение износа. Наконец, если твердость абразивных зерен ниже твердости стали, то износ зависит от разности в твердости и быстро уменьшается с увеличением этой разницы. Как известно, твердость характеризует сопротивление металла вдавливанию индентора, однако при испытании на твердость не выявляются микротрещины, концентраторы напряжений и другие потенциальные источники разрушения. Кроме того, неодинаков характер силового воздействия на металл при вдавливании индентора и при абразивном изнашивании. Так, при абразивном износе наблюдаются две стадии разрушения металла – внедрение абразивной частицы в трущуюся поверхность и срезание стружки или пластическое деформирование. Испытание на твердость в какой-то степени характеризует способность металла сопротивляться внедрению абразивных частиц, однако сопротивление снятию микростружки при этом не выявляется. Сопротивление металла на второй стадии абразивного износа, по-видимому, определяется сопротивлением движению дислокаций (сопротивлением пластическому деформированию под действием тангенциальных сил) и зависит от напряжений, необходимых для преодоления дислокациями барьеров в виде чужеродных атомов, частиц другой фазы и др.

Таким образом, сопротивление металла на второй стадии износа определяется в основном не его твердостью, а структурой.

Особенно существенно влияет на износостойкость углерод. Содержание углерода в приделах от 0,15 до 1,12%, в условиях сухого трения при скорости скольжения 0,5 *м/сек* и удельном давлении 5 $Мн/м^2$ (0,5 $кг/мм^2$) показало, что с увеличением содержания углерода износостойкость увеличивается.

Анализ источников информации позволяет сделать вывод о том, что интенсивность износа пары рельс-колесо преобладает от действия поперечного скольжения, а продольное качение приводит к интенсивному износу только в режимах пробуксовки и юза.

Нормативный срок службы колеса крана определяется по ГОСТ 28648-90. На основании этого документа определяется срок эксплуатации колес: «Эксплуатация колес допускается при износе их реборд не более 50% первоначальной толщины и/или поверхности катания не более 1,15% первоначального диаметра D».

Помимо требований на эксплуатацию крановых колес, установленных вышеуказанным ГОСТом, на производстве существуют предельные нормы выбраковки, связанные с правилами устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов.

Запрещается эксплуатация кранов, если:

- трещины, отколы любых размеров на ребордах и в диске;
- износ реборды составляет более 50% от первоначальной толщины;
- износ поверхности катания более 2% от первоначального диаметра.

Проанализировав рынок кранов и наиболее часто изнашиваемых и ответственных деталей к ним, хочу предложить техническое решение для восстановления изношенных поверхностей крановых колес, в котором берется во внимание экономическая целесообразность этого процесса, по сравнению с изготовлением новых деталей. Затраты на материалы и количество технологических операций сокращается в несколько раз, что способствует экономии металла, топливно-энергетических и других природных ресурсов. Восстановление крановых колес методом электродуговой наплавки с применением ферромагнитной шихты обладает максимальной универсальностью, обеспечивает технические характеристики и ресурс восстановленных деталей не ниже требований, заданных техническими условиями на новую, имеет высокую производительность и технологическую устойчивость, базируется на доступном оборудовании, позволяет использовать имеющиеся на рынке материалы и обладает высокой технологичностью.

Восстановление деталей методом электродуговой наплавки с применением ферромагнитной шихты – сложный организационно-технологический процесс, при

котором, в отличие от производства новых деталей, в качестве заготовки используют изношенную, но уже сформированную деталь. В этом случае затраты на выполнение таких операций, как литье, ковка, штамповка и др. отсутствуют.

Сущность метода электродуговой наплавки с применением ферромагнитной шихты (рис. 1) заключается в том, что наплавка ведётся непрерывной электродной проволокой, на которую специальным устройством подается ферромагнитная шихта, налипающая на электрод за счет собственного магнитного поля цепи, образуя тем самым покрытие аналогичное покрытию сварочного электрода. Для обеспечения налипания шихты на проволоку в её состав вводятся ферромагнитные компоненты (железный порошок + FeCr, FeV).

Рассматриваемый способ позволяет варьировать в широких пределах химический состав наплавленного слоя, визуально наблюдать процесс наплавки, а также подобрать состав шихты и такие режимы наплавки, которые обеспечат стабильное горение дуги при относительно небольших значениях сварочного тока и получение бездефектного слоя с небольшими напряжениями и деформациями, отвечающие необходимым эксплуатационным требованиям без дополнительной термообработки.

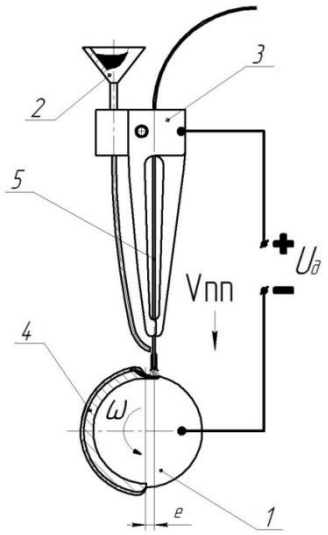


Рис. 1. Схема процесса электродуговой наплавки с ферромагнитной шихтой: 1 – деталь; 2 – бункер с шихтой; 3 – сварочная головка; 4 – наплавленный металл; 5 – сварочная проволока.

Наплавка дорожки катания может осуществляться четырьмя возможными способами (рис. 2): а) по винту; б) по кольцу; в) широкослойная; г) широкослойная с перекрытием.

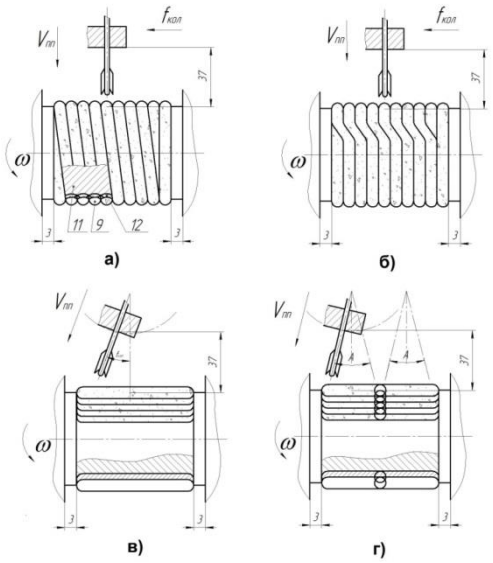


Рис. 2. Виды наплавок: а) по винту; б) по кольцу; в) широкослойная; г) широкослойная с перекрытием.

По винту и по кольцу используются для наплавки тонких слоев, а также на деталях где не допускается значительных термических вложений (детали малых диаметров). Широкослойная используется на небольших длинах участка наплавки, а широкослойная с перекрытием – для больших длин участков наплавки. Так как деталь имеет большой диаметр (250 мм), то тепло будет успевать рассеиваться по детали, и колесо не будет испытывать перегрева. Теоретически широкослойная наплавка может дать за счёт колебательного механизма дать длину наплавочного участка 70–80 мм., но оптимально 30–40 мм. (известно из опыта наплавок). Ширина восстанавливаемого участка поверхности дорожки катания – 70 мм. Используем наплавку широкослойную с перекрытием. Величина перекрытия – 3мм. Для наплавки реборды необходимо оставить с каждой стороны по 2 мм. Получаем, что ширина наплавляемого слоя при широкослойной наплавке с перекрытием будет составлять – 22 мм.

Наплавку реборды осуществляют следующим образом. Так как реборда может быть совсем изношена, тогда вначале наносится 1 слой по кольцу, 2 слой, затем 3-й и 4-й как показано на рисунке 15 (красным цветом обозначена практически полностью изношенная реборда, штриховкой – медное подкладное кольцо для формирования восстанавливаемой реборды).

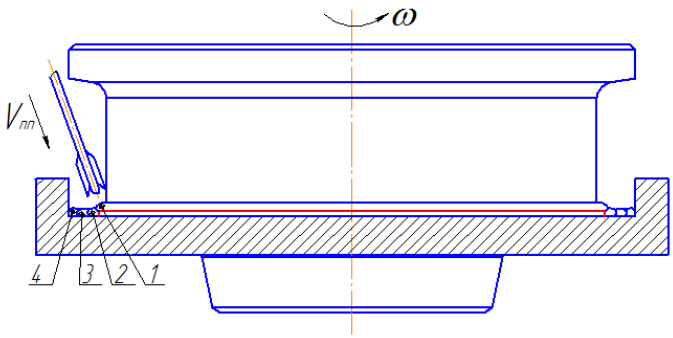


Рис. 3. Укладка первых слоёв при восстановлении реборды.

Далее производят наплавку на полученный валик, используя наплавку по кольцу (рис. 4), и восстанавливая реборду до её первоначальной величины (необходимо 20 кольцевых валиков).

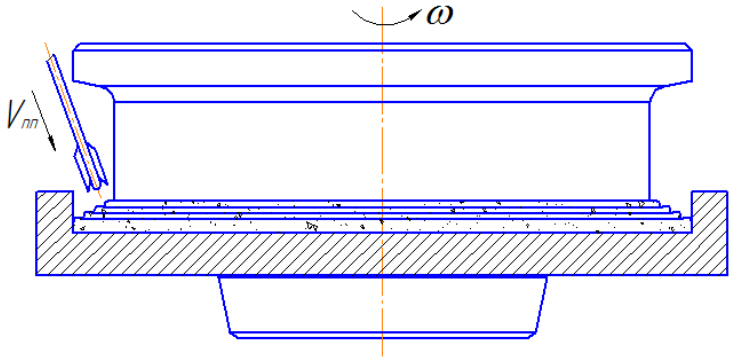


Рис. 4. Наплавка реборды по кольцу.

Материалами при электродуговой наплавке являются: сварочная проволока и шихта.

В качестве электродной проволоки применяется обычная сварочная проволока марок Св08, Св08А, Св08ГС, Св08Г2С и др. диаметром от 1,2 до 1,6 мм.

Защита дуги и сварочной ванны осуществляется ферромагнитной шихтой, в состав которой входят компоненты, используемые при изготовлении защитно-легирующего покрытия сварочных электродов.

Ферромагнитная шихта – это гранулируемая спеченная смесь тонко-помолотых материалов, замешанных на жидком стекле с размером частиц не более 0,4 мм. В состав шихты входят следующие компоненты: углерод (С), ферротитан (FeTi), феррохром (FeCr), феррованадий (FeV), мрамор электродный ($CaCO_3$), плавиковый шпат (CaF), силикат щелочного металла, порошок железа.

Варьируя процентным содержанием входящих в шихту компонентов можно в широком диапазоне изменять свойства наплавленного слоя в зависимости от требуемых механических и эксплуатационных характеристик.

Феррохром (FeCr), ферротитан (FeTi), феррованадий (FeV) и углерод (С) в совокупности позволяют получить наплавленный слой повышенной прочности и износостойкости без последующей термообработки в результате образования структуры мартенсита или перлита с карбидами Cr, V, Ti, обладающей более высокой твердостью по сравнению с карбидами железа.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика твердости карбидов.

Карбиды	F_2C	Cr_2C_2	Mo_2C	WC	VC	TiC	B_4C
Твердость НВ, МПа	10500	12500	16000	17500	21000	32000	50000

Кроме того, ферротитан, феррохром и феррованадий способствуют раскислению расплавленного металла и измельчению структурных составляющих наплавленного слоя, что снижает вероятность образования трещин в процессе восстановления поверхности детали.

Электродный мрамор и плавиковый шпат, входящие в состав шихты, обеспечивают защиту расплавленного металла от воздействия атмосферы и способствуют связыванию и удалению в шлак серы, фосфора и водорода.

Для того чтобы добиться качественной наплавки были проведены исследования по влиянию компонентов ферромагнитной шихты на твердость наплавляемого слоя, а также отработаны необходимые режимы, приближенные к наплавке реальной детали. Главной идеей экспериментов было получение необходимой твердости в наплавленном слое, а так же рассмотреть влияние второго наплавленного слоя на первый и влияние разных компонентов, вводимых в шихту, на твердость (её увеличение).

В результате экспериментов были получены данные, позволившие составить сравнительную характеристику наплавочных материалов и наплавленных слоев.

Для эксперимента была осуществлена наплавка на болванку из материала сталь 65Г диаметром 50 мм. Было получено две наплавки шириной по 33,5 мм на расстоянии 33,5 мм с перекрытием (рис. 5). Наплавка производилась на подогретый металл, это связано с особенностью наплавок стали 65Г.

Для наплавки слоя использовалась шихта 2-х разных составов:

Состав №1	Состав №2
Fe – 45%;	Fe – 50%;
FeV – 20%;	FeSiCa – 20%;
FeMn – 8%;	FeTi – 6%;
FeTi – 7%;	$CaCo_3$ – 12%;
$CaCo_3$ – 10%;	CaF_2 –12%;
CaF_2 –10%;	

Это связано с тем, что во время наплавки на образец из стали 65Г происходит диффузия углерода в наплавленный слой, вследствие чего значительно увеличивается твердость наплавленного слоя. Поэтому был выбран состав шихты №1, который должен обеспечить твердость наплавленного слоя 43 – 48 HRC, а также состав №2 – который является более мягким с учетом диффузии углерода на поверхность наплавки.

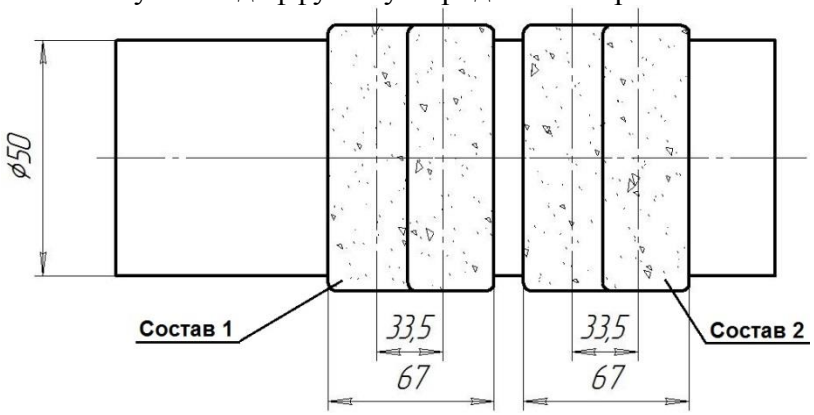


Рис. 5. Схема наплавляемых слоев.

Далее были вырезаны два образца шириной 7 мм, а затем замерена твердость HRC, как показано на рис. 6.

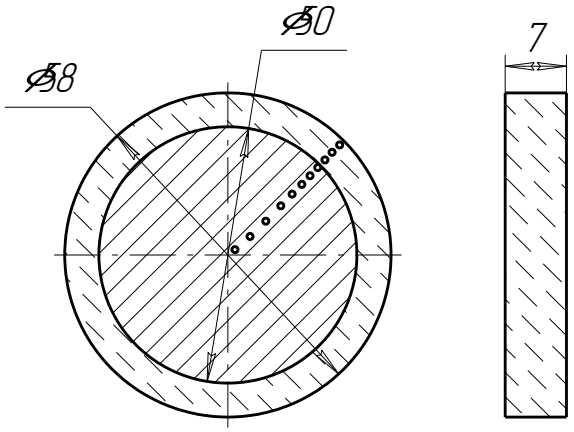


Рис. 6. Вид образца для измерения твердости.

Таблица 2 – Изменение твердости по радиусу среза.

R, мм	**Твердость, HRC**	
	Образец №1	Образец №2
1	8	9

5	8	9
7	8	9
10	9	10
14	10	9
16	9	9
20	11	10
22	10	12
24	11	13
25	23	22
26	25	28
27	52	39
28	54	41
29	55	43

Ниже приведены графики зависимости изменения твердости (HRC) наплавленного слоя по радиусу образца.

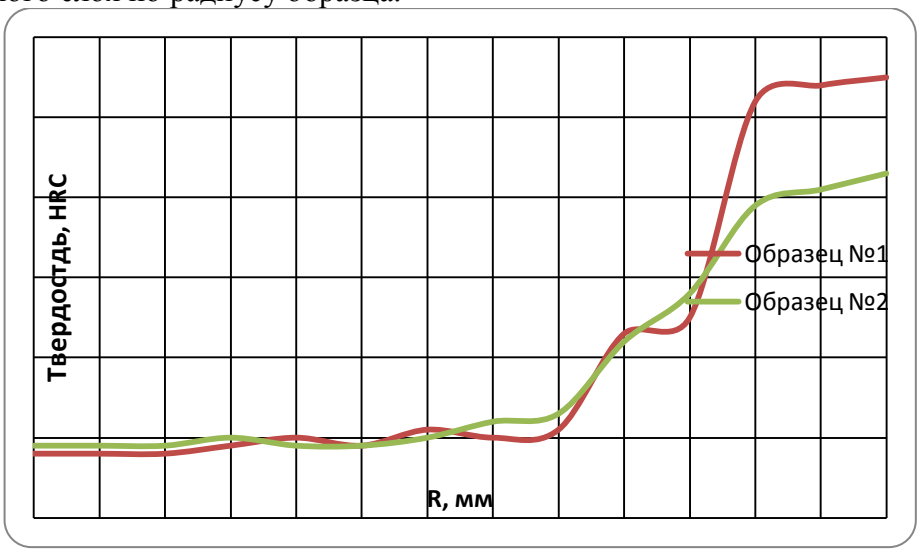


Рис. 7. График изменения твердости по радиусу среза.

Так же на этих же образцах была померена твердость по всей окружности.

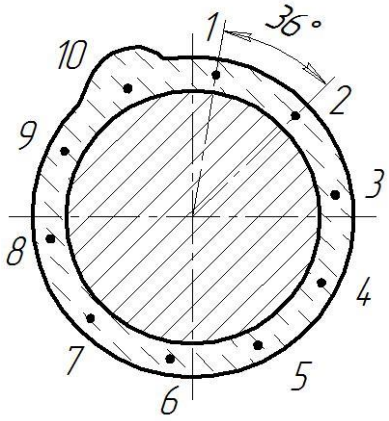


Рис. 8. Схема измерения твердости на образцах №1 и №2.

Таблица 3 – Изменение твердости наплавленного слоя по длине окружности.

№ п/п	**Твердость, HRC**	
	Образец №1	Образец №2
1	54	44
2	53	41
3	55	41
4	52	41
5	55	43
6	53	40
7	53	42
8	55	42
9	55	42
10	59	46

Ниже приведен график зависимости изменения твердости наплавленного слоя по длине окружности.

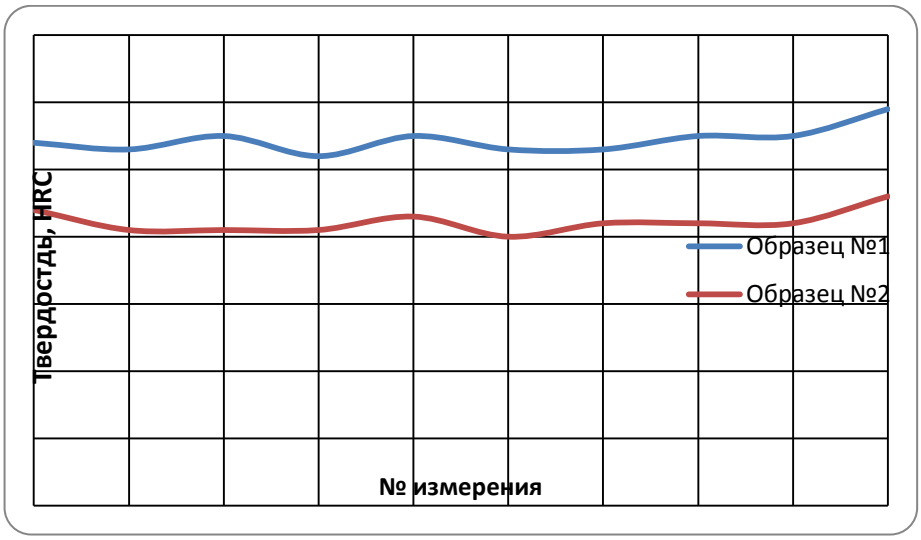


Рис. 9. График измерения твердости по длине окружности.

Из графика видно, что твердость по длине наплавки остается относительно постоянной, за исключением места, где происходит перехлест наплавленного слоя. В этом месте твердость увеличивается. Из этого следует, что при наплавке поверх предыдущего слоя не происходит перемешивания с основным металлом.

Из полученного исследования видно, что состав шихты №1 обладает большей твердостью, чем состав №2. Но по ГОСТ 28648-90 установлена твердость для крановых колес 32 – 42 HRC. Поэтому выбираем состав шихты №2. В состав шихты №1 добавлено слишком много карбидообразующих элементов FeMn, FeCr, FeTi, а также сказался эффект перемешивания наплавленного слоя с углеродом (в стали 65Г содержится 0,65% углерода), поэтому мы получили твердость, выходящую за нормы, установленные ГОСТ 28648-90.

Таким образом, в ходе проведенных исследований подобран требуемый состав ферромагнитной шихты заданной твердости, что обеспечивает продление срока службы подкрановых путей. Также предложен метод восстановления крановых колес на примере электродуговой наплавки с применением ферромагнитной шихты как наиболее производительный и экономически менее затратный.

Необходимость в реновационных (восстановительных) процессах в нашей жизни возникает всё чаще и чаще, что позволяет экономить природные ресурсы, снижает

затраты и трудоёмкость на производство новых деталей, бережет экологию нашей планеты.

Литература

1. *Александров М.П.* Грузоподъёмные машины: Учебник для вузов. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана – Высшая школа, 2000 г. – 552с.
2. *Глазунов С.Н., Гаврилюк В.С., Вялков В.Г., Овешников А.В.* Технология восстановления стальных и чугунных деталей транспортных машин методом электродуговой наплавки с применением ферромагнитной шихты // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2002. – № 6. С. 3–5.
3. Ферромагнитная шихта для дуговой наплавки деталей машин, изготовленных из железоуглеродистых сплавов: пат. 2448823 Российская Федерация: МПК B23K 35/36 / Глазунов С.Н. и др.; заявитель и патентообладатель Апраксин Д.В. – № 2010104100/02; заявл. 09.02.2010; опубл. 27.04.2012, Бюл. № 12. – 7 с.
4. *Глазунов С.Н.* Курс лекций: Технологические процессы реновации. – М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009 г., 99с.
5. *Апраксин Д.В., Варламова Л.Д., Вялков В.Г., Глазунов С.Н., Слинко Д.Б.* Методические указания к лабораторным работам по дисциплине технологические процессы реновации (способы сварки и наплавки). – М.: Изд-во МГТУ, 2009. 60 с., ил.
6. http://www.metaljournal.com.ua/crane-engineering-2/
7. http://www.kranimpex.ru/cranes/crane-console
8. http://www.tehnom.ru/kolesa_kranovye.htm
9. http://www.el-kran.ru/category_6.html
10. http://www.uralremdetal.ru/production/shtampovka/

УДК 621.43.03

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ «ЭФФЕКТА Л.А. ЮТКИНА» В ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

Надежда Сергеевна Медвинская, Роман Александрович Матюхов,
студенты 4 курса,
кафедра «Автоматизированные станочные системы и инструменты»,
Университет машиностроения

Научные руководители:
1). А.А. Бекаев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные станочные системы и инструменты», Университет машиностроения
2). Т.В. Мусакова, учитель физики, МБОУ «Ликино-Дулевская гимназия»

Молния – типичный импульсный разряд в газе (воздухе), который сегодня хорошо изучен, и его легко можно получить в лабораторных условиях. Однако той же молнии, но возникающей в жидкости, до настоящего времени не уделялось должного внимания, хотя такие исследования проводились и проводятся [1, 4, 5 и др.].

В частности, одними из первых исследователей молнии в жидкости были естествоиспытатели (XVIII век) Т. Лейн и Дж. Пристли, позже (XX век) – Т. Сведберг и Ф. Фрюнгель, установившие, что электрический пробой жидкостей, так же как и воздуха, носит характер искры, воспринимаемой в виде отшнурованного узко и ярко светящегося канала. Однако они не заметили, что миллиметровый разряд в жидкости

может стать прообразом нового способа трансформации электрической энергии в механическую и широко использован в самых различных областях науки и техники. Сделал это только советский ученый Л.А. Юткин (05.08.1911-05.10.1980), который первым сформулировал новый способ трансформации электроэнергии в механическую, посредством жидкости, назвав его электрогидравлическим эффектом (ЭГЭ).

Сущность этого эффекта состоит в том [9], что при движении электроразряда высокого напряжения через жидкость в открытом или закрытом сосуде некоторый объем этой жидкости, находящийся в межэлектродном пространстве, мгновенно вскипает, в результате чего в сосуде образуется газожидкостная смесь. При расширении образовавшегося газа (объем которого превышает изначальный объем жидкости) возникают высокие и сверхвысокие избыточные гидравлические давления, способные совершать полезную механическую работу. То есть, если в закрытом сосуде установлен подвижный поршень, то можно получить его практически мгновенное перемещение – рабочий ход, а после прекращения действия избыточного давления происходит конденсация (релаксация) ранее образовавшихся паров жидкости, и поршень совершит обратный ход.

Это открытие стало базой для создания множества технологических процессов, которые широко применяются во многих отраслях промышленности всего мира – машиностроительной, металлургической, горно-геологоразведочной, нефтяной и др. Но наиболее актуальными, на взгляд авторов настоящей статьи, являются методы использования ЭГЭ в стремительно развивающихся автомобильной и строительной отраслях. Особенно автомобильной промышленности, находящейся под жесточайшим контролем свода экологических норм и правил, разработанных Комитетом по внутреннему транспорту ЕЭК ООН. В связи с чем, автопроизводителям не остается иного выхода, как создавать более совершенные, экологически чистые и экономически выгодные двигатели внутреннего сгорания (ДВС) и/или использовать силовые установки комбинированного типа (гибриды) на основе ДВС. Однако, в настоящее время, им пока приходится иметь дело с традиционными ДВС и их системами. И прежде всего с системой топливоподачи, в центре которой находится топливный насос высокого давления (ТНВД) – устройство, которое к сожалению, имеет ряд недостатков, связанных, главным образом, с ограниченными техническими возможностями используемого электромеханического привода (сложностью конструкции, технологии изготовления и сборки; высокой стоимостью и недолговечностью прецизионных плунжерных пар, большими мощностными затратами на его работу), ограниченными (не более $100 МПа$) возможностями по давлению впрыскивания и др., что крайне затрудняет решение все ужесточающихся норм по выбросам вредных веществ в атмосферу. Для решения данной проблемы возможно использование совершенно иного принципа работы ТНВД, разработанного авторами статьи.

Предложенную идею подтверждают многочисленные испытания лабораторной установки – макета принципиально новой конструкции, разработанного авторами, топливного электрогидравлического насоса высокого давления (ЭГ-насоса), работающего на эффекте Л.А. Юткина. Их результаты показывают – современные серийно выпускаемые ТНВД могут быть успешно заменены более простыми, компактными, надежными и менее металлоемкими насосными ЭГ-установками [6, 8].

Разработанный ЭГ-насос конструктивно состоит (рис. 1) из рабочей камеры (корпус насоса); всасывающего и напорного гидроклапанов, работающих по принципу “ниппеля”; датчика контроля давлений, установленного в рабочей камере насоса; двух высоковольтных электродов с контакторами «+» и «–».

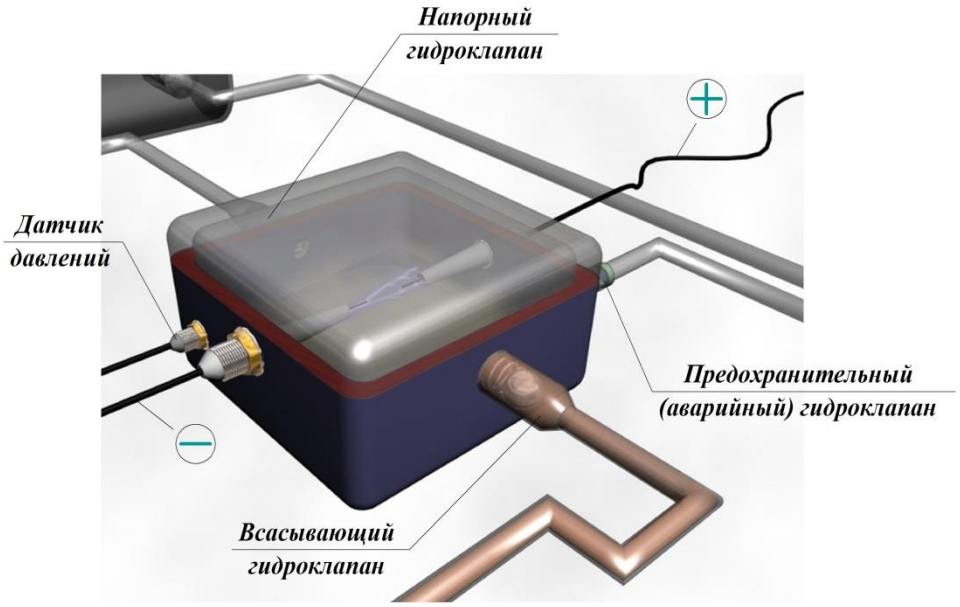


Рис. 1. Разработанный электрогидравлический насос (ЭГ-насос) высокого давления.

Электрогидравлическая схема топливоподачи с ЭГ-насосом (в 3-D) приведена на рис. 2. Принцип ее работы состоит в создании серии (ступеней) ударных волн давлений в рабочей камере насоса, создаваемых за счет пропускания электроразряда между высоковольтными электродами. Эти волны создаются в моменты открытия/закрытия напорного и всасывающего гидроклапанов, что обеспечивает дозированную подачу топлива.

Так, в момент начала импульса в межэлектродном промежутке рабочей камеры ЭГ-насоса происходит резкое повышение температуры, и интенсивное испарение некоторой части топлива, в результате чего образуется паротопливная смесь, которая быстро расширяется и, создавая избыточное давление, на том месте, где был разряд, образует значительную по объему кавитационную газовую полость.

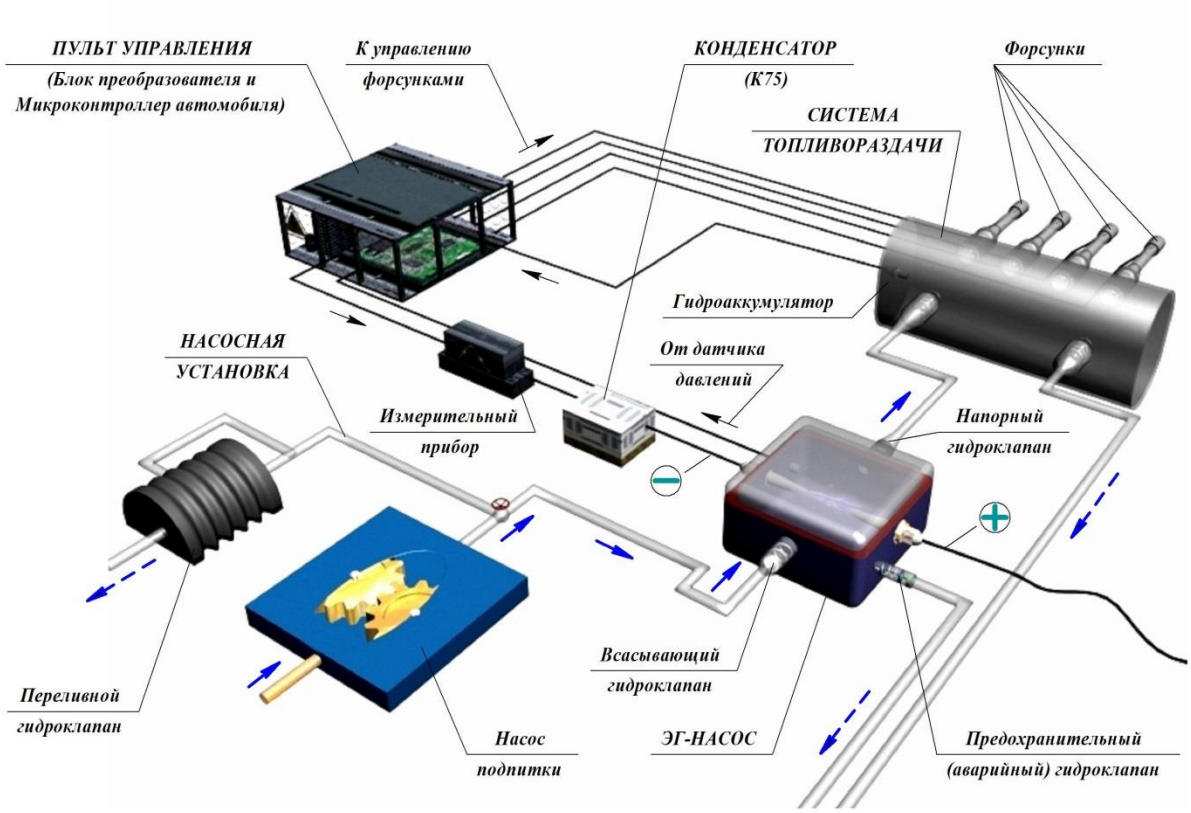


Рис. 2. Электрогидравлическая схема топливоподачи со встроенным ЭГ-насосом.

Под действием избыточного давления шарик напорного гидроклапана, преодолевая усилие пружины, отходит от седла и перепускает смесь из рабочей камеры в гидроаккумулятор системы топливораздачи (в этот момент всасывающий гидроклапан полностью закрывается).

Оставшаяся в насосе кавитационная газовая полость после выхода топлива через напорный гидроклапан мгновенно сжимается (релаксирует), что приводит к образованию разряжения (вакуум) в рабочей камере, под действием которого открывается всасывающий гидроклапан (напорный гидроклапан полностью закрывается), и камера насоса заполняется новой порцией топлива. Далее процесс повторяется.

Результаты экспериментальных исследований [6], проведенные на лабораторном образце ЭГ-насоса показали, что создаваемое избыточное давление $P_{разр.}$ топлива в канале разряда рабочей камеры насоса зависит как от емкости конденсатора C, так и от индуктивности цепи разряда L электронного блока преобразователя. Это хорошо видно из рис. 3 и 4, на которых приведены зависимости этого давления $P_{разр.}$ в функции индуктивности $L \cdot 10^{-3} Гн$ и емкости $C \cdot 10^{-6} Ф$ при постоянном напряжении пробоя $U_{пр.}$ на высоковольтных электродах, равном $40 кВ$.

Так, из рис. 3 можно заключить, что уменьшение индуктивности с $2{,}2 \cdot 10^{-3}$ до $0{,}02 \cdot 10^{-3} Гн$ резко увеличивает давления разряда с 62 до $130 МПа$ при постоянной электроемкости C (грубая регулировка давления), а из рис. 4 видно, что с уменьшением емкости (тонкая регулировка давления) с $0{,}5 \cdot 10^{-6}$ до $0{,}01 \cdot 10^{-6} Ф$ и постоянной индуктивности L давление $P_{разр.}$ будет плавно нарастать с 25 до $62 МПа$. Следовательно, для увеличения давления разряда и КПД насоса целесообразно уменьшать (до определенных значений) индуктивность L и емкость C конденсатора блока преобразователя.

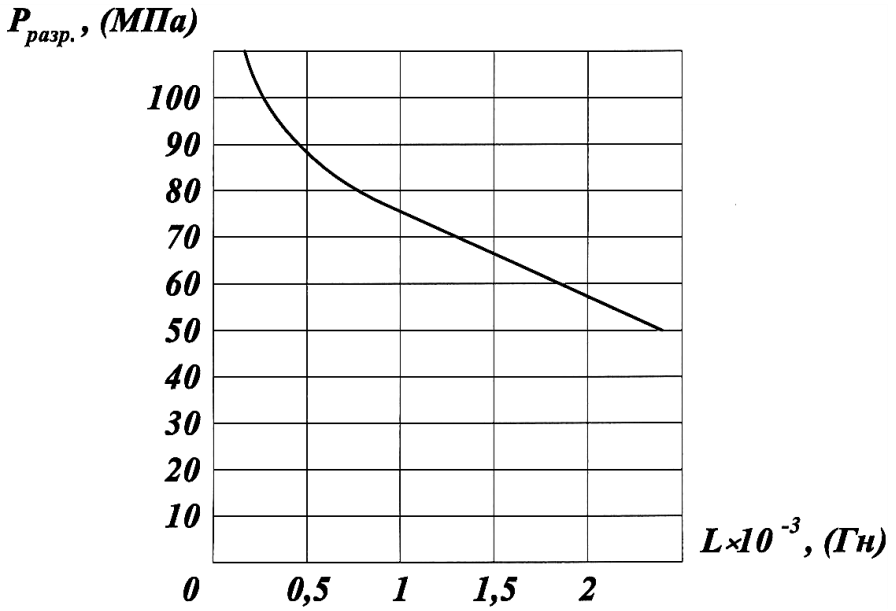


Рис. 3. Зависимость давления в канале разряда от индуктивности цепи.

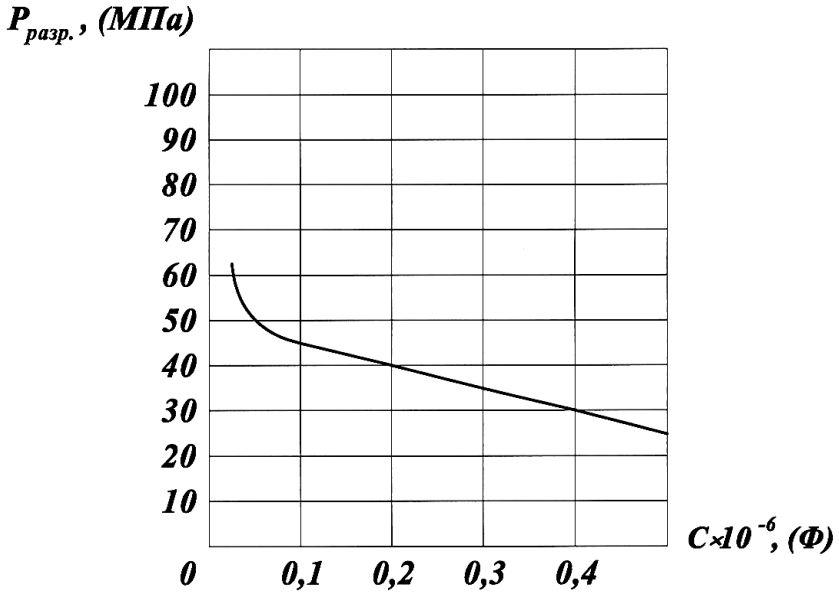


Рис. 4. Зависимость давления в канале разряда от емкости цепи.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований показали, во-первых, возможность практического применения рассматриваемой конструкции насоса (не имеющей аналогов в мире), работающей на эффекте Л.А. Юткина без использования какого-либо электромеханического привода; во-вторых, возможность создания больших избыточных давлений, существенно превышающих $100 МПа$ (здесь, граница создаваемых давлений будет определяться прочностью стенок корпуса насоса); и, в-третьих, плавной (грубая и тонкая) регулировкой избыточных давлений топлива, создаваемых в рабочей камере насоса (гибкое управление).

К другому актуальному направлению практического применения “эффекта Юткина” следует отнести ЭГ-устройства, предназначенные для долбления и дробления твердой породы. Так, авторами была разработана новая конструкция электрогидравлического отбойного молотка – по сути, электрогидравлического перфоратора (ЭГ-перфоратор), предназначенного для использования в строительном и горнодобывающем деле, когда необходима регулируемая сила и частота удара [2, 3].

Как установлено, самым ближайшим аналогом такого устройства является инструмент с электрогидравлическим приводом [7], спроектированный на основе ручной электродрели с очень низким расчетным значением КПД ($\approx 37\%$). Кроме того, он недостаточно надежен, что обусловлено высокой сложностью конструкции (а соответственно ее стоимостью), и к тому же, у него возникает необходимость в ограничении реализуемой силы удара (из-за возникновения мощной отдачи).

Авторами же разработана более простая, легкая, компактная и надежная установка ЭГ-перфоратора [3]. Разработанный ЭГ-перфоратор (рис. 5) имеет рабочую камеру *1*, которая заполнена водой с присадками, обеспечивающими ее незамерзание при отрицательных температурах и уменьшающих трение между слоями жидкости (за счет малой вязкости). В ней два (*2* и *3*) электрода с фторопластовой или аналогичной изоляцией, на которые от сети, аккумулятора или генератора, подают высокое напряжение, которое может регулироваться до требуемых величин.

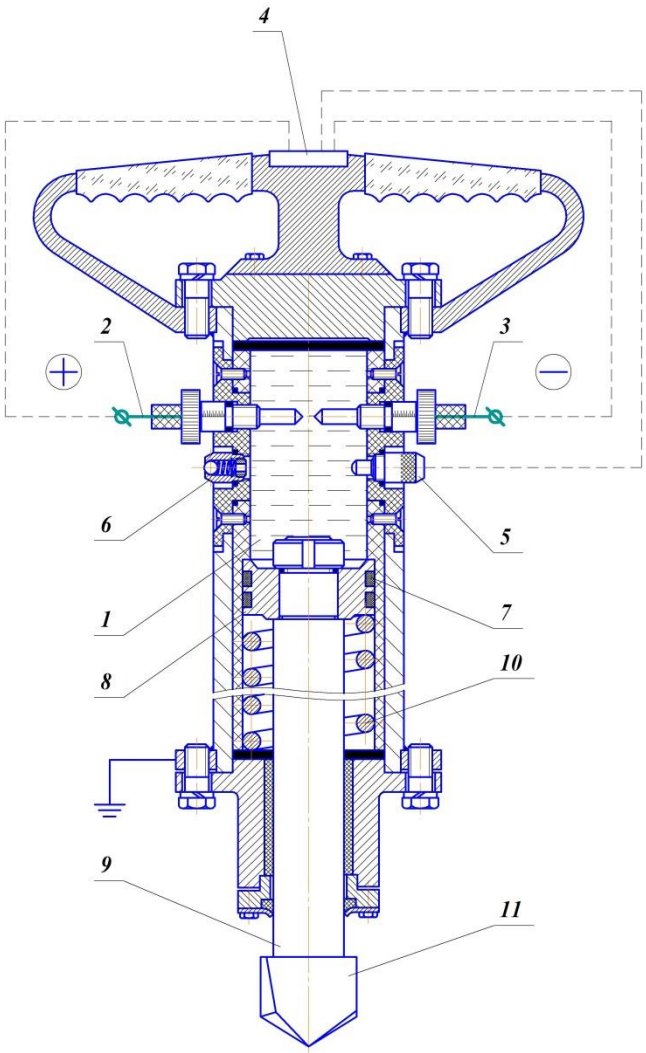


Рис. 5. Конструктивно-принципиальная схема ЭГ-перфоратора: *1* – рабочая камера; *2* и *3* – электроды; *4* – пульт управления; *5* – датчик давления; *6* – обратный гидроклапан; *7* – уплотнительные кольца; *8* – поршень; *9* – шток; *10* – пружина; *11* – сменный наконечник.

В рабочей камере установлен датчик давления *5*, сигнализирующий о необходимости дополнительной подпитки ее жидкостью через обратный гидроклапан *6*. Это можно сделать шприцем или аналогичными средствами (однако в этом практически не возникнет необходимости из-за хорошего уплотнения поршня кольцами *7*).

При подаче с пульта *4* управления напряжения разряда между электродами возникает электрическая дуга, происходит мгновенное испарение (кипение) жидкости. Возникающее при этом давление парожидкостной смеси давит на шток *9* поршня *8*, который, перемещаясь, преодолевает усилие пружины *10*, обеспечивая рабочее действие сменным ударным наконечником *11*.

После совершения ударного действия идет процесс конденсации (релаксации) воздушных пузырьков, в рабочей камере *1* создается вакуум, и при растяжении пружины *10* поршень *8* смещается в верхнее положение. Далее процесс повторяется.

Величину усилия и частоту удара, очевидно, можно регулировать напряжением, подаваемым на вход электродов от пульта управления *4*.

Результаты экспериментальных исследований также показали, что КПД ЭГ-перфоратора, работающего “на воде”, существенно отличается от КПД ЭГ-перфоратора, работающего на других (менее вязких) жидкостях.

Так, при исследовании КПД лабораторного образца ЭГ-перфоратора было установлено, что при ходе поршня, равном или меньшем $12 мм$, в воде с присадками

(минеральное масло) КПД ЭГ-перфоратора составлял около 27–30%, а при больших ходах поршня уменьшался.

Полученные результаты хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований, выполненных Л.А. Юткиным [9], который установил, что КПД электрогидравлических устройств, работающих на воде, может быть равен $\eta \approx 40\%$ при удалении поршня от канала разряда на расстояние $\geq 20мм$, а при использовании других жидкостей КПД будет зависеть от их вязкости.

Следовательно, для увеличения КПД ЭГ-перфоратора необходимо подбирать такую жидкость, у которой коэффициент вязкости (коэффициент внутреннего трения слоев жидкости) был бы как можно меньший. Например, альтернативой воде может выступить полиметилсилоксан (кремнийорганическая жидкость), имеющий вязкость, почти в 2 раза меньшую вязкости воды ($0{,}0065Cm$) и более широкий диапазон рабочих температур (от –40 до $+200^{\circ}C$).

Вместо воды или в сочетании с ней может быть также рекомендована силиконовая жидкость марки «$DOW\,Corning\ 200$» с той же вязкостью и температурным диапазоном применения, что и полиметилсилоксан.

Обобщая вышеизложенное, можно сказать, что ЭГ-устройства, работающие на “эффекте Юткина”, могут найти широчайшее применение в автомобильной и строительной индустрии, так как они технически более совершенны, чем любые существующие их аналоги.

Так, ЭГ-насос обладает следующими достоинствами.

Во-первых, он может работать без использования какого-либо электромеханического привода, что исключает мощностные затраты, связанные с приведением в движение привода ТНВД, и снижает шумность работы ДВС.

Во-вторых, на его основе можно создать бóльшие, чем у серийных ТНВД, избыточные давления, под действием которых топливо будет более качественно распыляться в камерах сгорания, повышая топливно-экономические показатели ДВС.

В-третьих, он позволяет с помощью электронного пульта управления гибко управлять его работой, что улучшает процесс контроля дозирования и впрыскивания топлива в камеру сгорания.

В-четвертых, его применение значительно снижает металлоемкость конструкции и стоимость топливной системы ДВС, а также упрощает ее техническое обслуживание.

В-пятых, получается “попутный” эффект – разогретое топливо, частично содержащее пары, обеспечивает наилучшее сгорание в цилиндрах ДВС.

Применение ЭГЭ в ЭГ-перфораторе обеспечивает возможность регулировки (с пульта управления) силы и частоты ударов; защищает оператора от повышенной шумности, свойственной пневматическим и бензиновым отбойным молоткам; позволяет работать как от электрической сети, так и от батареи аккумуляторов или автомобильного бортового генератора; причем и в том, и в другом, и в третьем случае обеспечивается экологическая чистота рассматриваемых устройств, поскольку они потребляют только электрическую энергию.

Литература

1. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Искровой разряд. – М.: МФТИ, 1997. – 320 с.
2. *Бекаев А.А.* Использование электрогидравлического эффекта в дорожно-строительных машинах // Строительные и дорожные машины. – 2011, №3. – с. 30-32.
3. *Бекаев А.А., Медвинская Н.С., Матюхов Р.А.* Реализация «эффекта Юткина» в ЭГЭ-перфораторе // Материалы Юбилейной XXV Международной иновационно-ориентированной конференции молодых ученых и студентов (МИКМУС-2013). –

М.: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, ноябрь 13-15, 2013. – с. 84
4. *Драбкина С.И.* О канале искрового разряда // ЖЭТФ. – 1951, Т. 21. – с. 473-483.
5. *Зингерман А.С.* Теория и механизм пробоя газа // Успехи физических наук. – 1941, Т. 25. – с. 254-286.
6. *Максимов Ю.В., Соковиков В.К., Бекаев А.А., Строков П.И.* Топливный насос нового поколения // Известия МГТУ «МАМИ». – 2012, №2(14). Т. 2. – с. 241-245.
7. *Патент РФ на изобретение №2015873* «Инструмент с электрогидравлическим приводом», опубл. 15.07.94.
8. *Соковиков В.К., Бекаев А.А., Строков П.И.* Электрогидродинамический двигатель // Транспорт на альтернативном топливе. – 2013, №3(33). – с. 26-30.
9. *Юткин Л.А.* Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. – Л.: Машиностроение, ленингр. отд., 1986. – 253 с. ил.