

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Студенческое научно-техническое общество имени Н.Е. Жуковского
Научно-учебный комплекс «Машиностроительные технологии»
Кафедра «Технологии обработки давлением»
ООО «КванторФорм»



Всероссийская научно-техническая конференция студентов
«Студенческая научная весна 2012:
Машиностроительные технологии»

МГТУ им. Н.Э.Баумана, 4 - 7 апреля 2012г.

СБОРНИК СТАТЕЙ



Москва, 2012

Министерство по образованию и науке РФ

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

Студенческое научно-техническое общество имени Н.Е.Жуковского

Научно-учебный комплекс
"Машиностроительные технологии"

Кафедра «Технологии обработки давлением»

ООО «КванторФорм»

Сборник статей

Всероссийской научно-технической конференции студентов
Студенческая научная весна 2012:
«Машиностроительные технологии»
4 – 7 апреля 2012 г.

Москва — 2012

УДК 621
ББК 34.5
С23

С23 Сборник статей Всероссийской научно-технической конференции студентов «Студенческая научная весна 2012: Машиностроительные технологии» 4-7 апреля 2012 г.. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 422 с.

В сборник вошли статьи студентов, представленных на Всероссийской научно-технической конференции студентов «Студенческая научная весна 2012: Машиностроительные технологии», которая проходит в рамках общеуниверситетской конференции «Студенческая научная весна-2012».

Сборник представляет интерес для студентов, аспирантов и преподавателей ВУЗов

Издание осуществлено с оригиналов авторов.

ДОРОГИЕ ДРУЗЬЯ!

Вы держите в руках сборник, в который вошли работы участников Всероссийской научно – технической конференции студентов «Студенческая весна 2012: Машиностроительные технологии».

Цель конференции – предоставить студентам возможность рассказать о самостоятельно выполненных научно – исследовательских проектах, обменяться идеями и опытом, соотнести уровень собственных разработок с работами других студентов.

Задачи конференции: накопление опыта студентами по разработке и предоставлению законченных проектов; формирование мотивации к изучению предметов специальности; информирование и обучение студентов; формирование интереса к специальности и профориентации абитуриентов; интегрирование студентов в сообщество инженеров; подтверждение уровня знаний дипломами и победами в конкурсах, что может быть использовано студентами в дальнейшем при устройстве на работу и для продолжения обучения.

Факультет «Машиностроительные технологии» один из самых старейших в МГТУ им. Н. Э. Баумана, сейчас ему более 140 лет. Он был создан в 1868 году, когда Императорское московское техническое училище получило статус высшего специального заведения и приступило к подготовке инженеров на отделениях: «Инженерно - механическом» и «Инженерно - технологическом».

Острая необходимость в таких инженерах – универсалах для России была обусловлена выдающимися фундаментальными научными открытиями и техническими изобретениями того времени, которые в истории техники названы промышленным переворотом. Его важным результатом стало возникновение отрасли машиностроения, выпускающей машины для других фабрик и заводов. Так началась подготовка квалифицированных инженеров, способных создавать технологические процессы обработки материалов, конструировать и создавать машины для промышленности.

Сегодня факультет готовит инженеров широкого профиля с фундаментальным университетским образованием и специальной профилирующей подготовкой на 13 кафедрах по металлорежущим станкам и оборудованию; инструментальной технике и технологии; технологии машиностроения; метрологии и взаимозаменяемости; литейным технологиям; технологии обработки давлением; технологии сварки и диагностики; материаловедению; промышленному дизайну; оборудованию и технологии прокатки; электронным технологиям в машиностроении; лазерным технологиям в машиностроении; технологии обработки материалов.

Основатели научных школ факультета – проф. И. М. Беспрозванный, проф. А. П. Гавриленко, проф. Г. М. Головин, проф. А. И. Зимин, проф. В. М. Кован, акад. Г. А. Николаев, проф. Н. Н. Рубцов, проф. М. А. Саверин, проф. И. И. Сидорин, проф. К. К. Хренов, акад. А. И. Целиков.

В настоящее время двенадцать профилирующих кафедр факультета готовят инженеров, бакалавров и магистров. На кафедрах факультета работают 268 преподавателей, которые обучают 2000 студентов, более 100 аспирантов, около 100 зарубежных студентов из 12 стран. Студенты проходят стажировку во Франции, Канаде, Германии, Японии.

На факультете работают более двадцати лауреатов Государственных премий и премий Правительства РФ. Учебный процесс ведут 54 профессора, доктора

технических наук, 191 доцент, кандидаты наук, 23 старших преподавателя и 17 ассистентов. Среди преподавательского состава 13 действительных членов и членов корреспондентов отраслевых академий. Кафедры факультета являются ведущими в России, активно сотрудничают с университетами Германии, Франции, Великобритании, США, Канады, Китая, Японии. Исследования, проводимые учеными факультета, отражают мировые тенденции развития промышленного общества.

Всероссийская научно – техническая конференция студентов позволит дать общую оценку уровня профессиональной и научной подготовки студенчества из технических вузов России и других стран и расширить их кругозор по многим направлениям науки. Желаем успеха всем участникам конференции и ждем Вас в следующем году.

Секция №1
Металлорежущие станки и оборудование

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ НА ЭТАПЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Валентин Сергеевич Дудкин ⁽¹⁾, Игорь Павлович Иванов ⁽²⁾,
Михаил Игоревич Коньшков ⁽¹⁾

*Студенты 5 курса,
кафедра «Литейные технологии»⁽¹⁾, кафедра «Металлорежущие станки»⁽²⁾,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: А.Г. Ягопольский,
старший преподаватель кафедры «Металлорежущие станки»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Одной из ответственных частей металлорежущих станков является станина – основная корпусная несущая часть технологической машины, на которой монтируются рабочие узлы и механизмы, и от прочности, жесткости и износостойкости которой зависит качество работы всей машины в целом. Она воспринимает усилия, действующие при работе механизмов, и обеспечивает точное взаимное расположение всех основных узлов машины. Станины у большинства станков представляют собой литые конструкции из серого чугуна различных марок.

Серый чугун является основным материалом для изготовления корпусных литых деталей металлорежущих станков, так как высокопрочный чугун с шаровидным графитом не часто используется для этой цели. Общая масса чугунных деталей составляет 70...80 % массы станка. К особенностям литейного производства станкостроительной отрасли относится широкая номенклатура выпускаемых, отливок (около 200 000 наименований) с большим колебанием массы — от 0,1 кг до 100 т — при средней и повышенной сложности с преобладанием мелкосерийного характера производства.

В применении к металлорежущим станкам важнейшими требованиями к отливкам являются износостойкость, стабильность геометрической формы и жесткость, чем и определяются требования к серому чугуну по микроструктуре и твердости.

Важным требованием является сохранение норм точности станков в процессах изготовления и эксплуатации, что зависит от стабильности геометрии базовых отливок и зависит от величины остаточных напряжений и релаксационной стойкости металла. Хотя на всех этапах конструирования и изготовления отливки принимаются меры по предотвращению коробления, однако, как правило, для базовых деталей станков повышенной и высокой точности обязательно применяется специальный стабилизирующий процесс.

Обеспечение надлежащей структуры и твердости в литых станинах возможно разными способами, из которых наиболее эффективными являются подбор состава металла и скорости охлаждения отливок.

Состав металла подбирается, как и для всех отливок, по структурной диаграмме, но для массивных отливок особенно важно правильно выбрать вариант легирования, обеспечивающий требуемые дисперсность перлита и микротвердость чугуна. Использование для этого тех или иных легирующих элементов различно на разных заводах. Наиболее широкое применение на станкозаводах нашли следующие варианты легирования чугуна: Ni, Si и Cr по 0,2...0,3%; 0,2...0,3% Ni, 0,3...0,4% Cr и

1,3...1,5% Mn (при модифицировании); 0,8...1,0% Si и 0,3...0,5% Cr; 0,4...0,6% Ni и до 0,04% В - для тяжелых отливок.

Для регулирования скорости охлаждения, как было сказано выше необходимо применение холодильников.

Плоские холодильники для отливок станин, столов, траверс изготавливают толщиной 0,3...0,4 толщины направляющих, шириной 0,8 ширины направляющих, а длиной 1,0...1,5 ширины направляющих.

Для крупных отливок можно рекомендовать, плоские холодильники длиной 150 мм, шириной 60, 90 и 120 мм и толщиной 35 и 65 мм. При охлаждении криволинейных поверхностей холодильники выполняют по их контуру. В средних отливках они, создавая резкое переохлаждение металла, способствуют возникновению в чугуне междендритного и сетчатого графита и образованию структурно-свободного Fe или Ц. Поэтому их в средних и даже в тяжелых отливках заменяют часто более «мягкими» холодильниками, например шпильчатыми, ребристыми или карборундовыми с меньшей теплопроводностью. Такие холодильники обеспечивают требуемую структуру графита в отливках (рис. 1).

Однако для изменения структуры и снижения остаточных напряжений в крупных и средних отливках, а также сокращения технологического цикла их изготовления можно использовать кроме холодильников принудительное воздушное охлаждение и принудительное увлажнение литейной формы, регулирование которых, в противоположность холодильникам, возможно в течение всего процесса кристаллизации и последующего охлаждения металла. Схема такой установки в общем виде представлена на рис. 2.

Эффективность методов принудительного охлаждения отливок, как средства снижения остаточных напряжений и сокращения технологического цикла, существенно возрастает при автоматическом регулировании процесса охлаждения отливки. Одной из наиболее простых и надежно реализуемых является система, в которой регулирующим параметром автоматики служит разность температур между основными элементами отливки (тонкой стенкой и массивной направляющей), фиксируемая дифференциальной термопарой, образованной двумя термопарами, установленными соответственно в стенке и направляющей отливки.

Учитывая вышеперечисленные факторы, влияющие на процесс изготовления литых станин металлорежущих станков и высокие технологические требования, предъявляемые им, может быть предложена следующая схема изготовления литой станины, показанная на рис. 3.

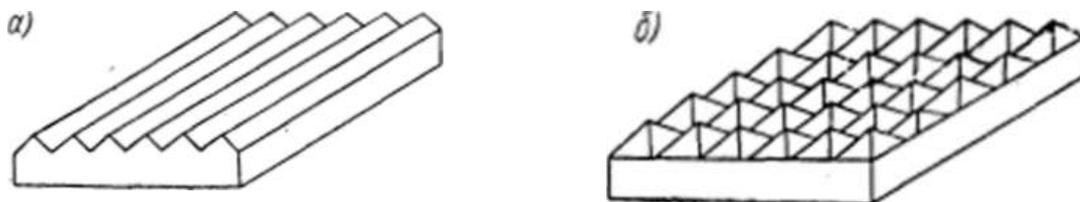


Рис. 1. Типы холодильников:
а — ребристые; б — шпильчатые

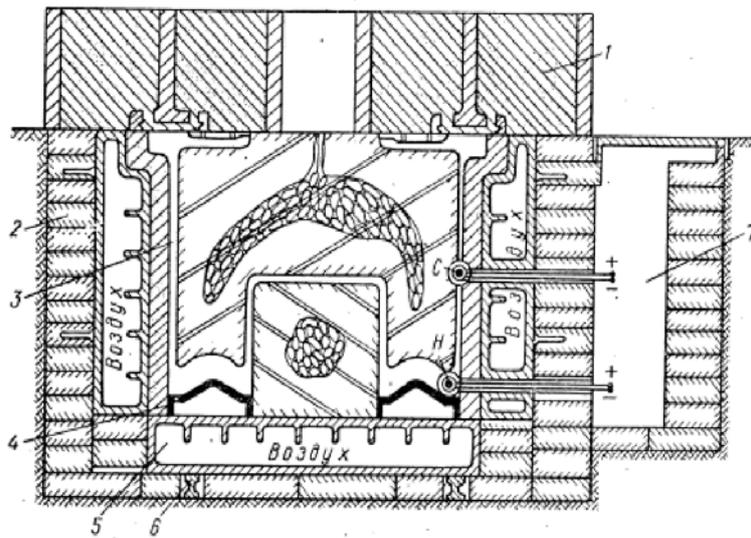


Рис. 2. Схема установки:

- 1 - верхняя полуформа; 2 - кладка кессона; 3 – отливка; 4 – холодильники;
5 - полая чугунная плита; 6 - установочные балки; 7 – колодец;
С, Н - термопары в стенке и направляющей отливки

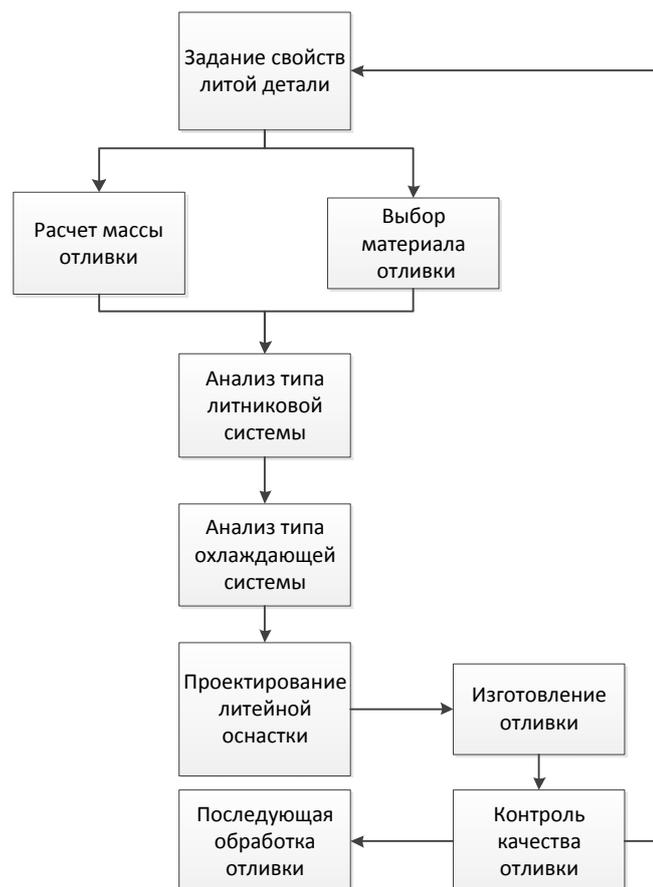


Рис. 3. Технологическая схема изготовления литой станины

Литература

1. Мухин А. В., Спиридонов О. В., Схиртладзе А. Г., Харламов Г. А. Производство деталей металлорежущих станков: Учебное пособие для машиностроительных специальностей вузов. – М.: Машиностроение, 2001. – 560 с.
2. Меламед Г., Счастливец Ф. Надёжность и долговечность станочных систем. Минск, «Беларусь», 1967. – 224 с.
3. Справочник по чугунному литью./Под ред. Д-ра техн. наук Н. Г. Гиршовича. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1978. – 758 с.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ БОРЬБЫ С ТЕПЛОВЫМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Екатерина Михайловна Загороднюк⁽¹⁾, Игорь Павлович Иванов⁽²⁾

*Студенты 5 курса,
кафедра «Литейные технологии»⁽¹⁾, кафедра «Металлорежущие станки»⁽²⁾,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: А.Г. Ягопольский,
старший преподаватель кафедры «Металлорежущие станки»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Обеспечение стабильного уровня надежности технологического оборудования (в данном случае – металлорежущего станка) зависит от большого количества различных факторов и процессов, происходящих в станке.

Надежность станка – это его динамика качества, поскольку рассматривается изменение характеристик станка во времени. Поэтому вредные процессы, приводящие к отказам станка, следует классифицировать по скорости их протекания и рассмотреть картинку взаимодействия станка с этими процессами.

Для оценки степени изменения показателей качества станка во времени целесообразно все процессы, происходящие в станке и изменяющие его начальные параметры разбить по скорости их протекания на три группы (рис. 1).

Быстро протекающие процессы (заканчиваются в пределах цикла работы станка); к ним относятся вибрации узлов и механизмов, изменения сил трения в подвижных соединениях, колебания рабочих нагрузок и другие процессы.

Процессы средней скорости (протекают за время непрерывной работы станка); к ним относятся тепловые деформации, изменение параметров окружающей среды (влажность), износ и коррозия некоторых малостойких элементов и др.

Медленно протекающие процессы (протекают в течении всего периода эксплуатации станка); к этим процессам относятся изнашивание, коррозия, перераспределение внутренних напряжений, ползучесть материалов и др.

Как было сказано выше, тепловые деформации узлов и исполнительных механизмов станка, характеризующиеся как процессы средней скорости, оказывают существенное влияние на баланс формирования погрешности обработки изделий и соответственно снижают надежность и качество технологического оборудования в целом.

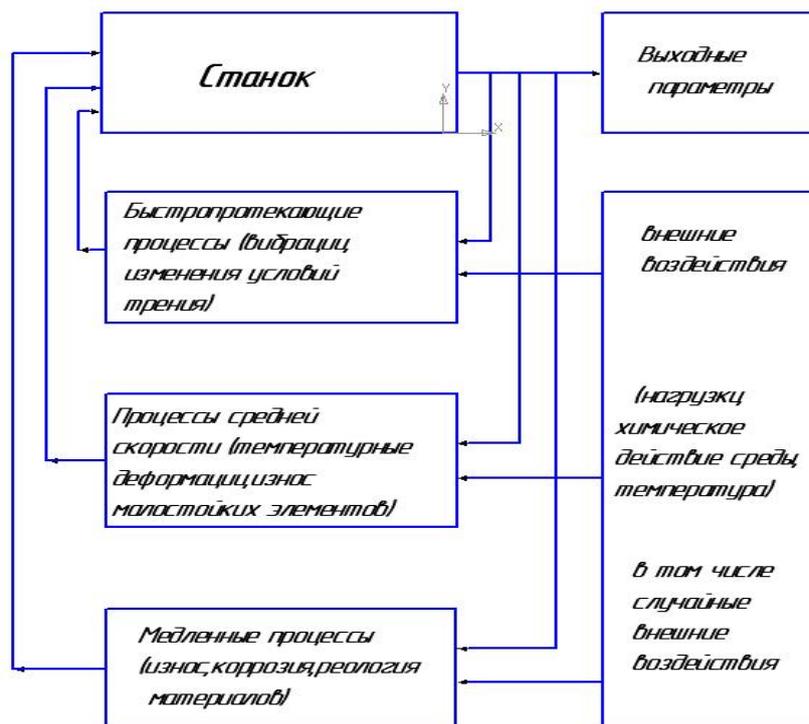


Рис. 1. Процессы, действующие на станок при его эксплуатации

Для определения возможных способов компенсации тепловых деформации станка, применяется метод координатных систем и модель формирования погрешности относительного положения исполнительных механизмов станка.

Анализ указанной модели показал, что возможны два способа компенсации погрешностей станков и повышения точности их выходных параметров:

а) с помощью абсолютной стабилизации положений исполнительных механизмов станка, несущих заготовку и режущий инструмент относительно заданного для них положения;

б) с помощью относительной стабилизации, когда проводится изменение относительного пространственного положения одного из исполнительных механизмов станка относительно другого.

Компенсация погрешностей из-за тепловых деформаций в зависимости от способа получения информации о них может проводиться следующим образом:

а) на основе использования априорной информации о температурных деформациях станка, полученной аналитическими расчетами или путем их предварительного экспериментального измерения. Полученная информация может учитываться при составлении управляющей программы путем ее предсказания, либо вводиться в память устройства ЧПУ для последующей коррекции управляющих сигналов от устройства ЧПУ на исполнительные механизмы станка. Недостатком данного способа является то, что в этом случае проводится коррекция только систематической составляющей этих погрешностей станка;

б) на основе использования текущей информации о температуре нагрева или тепловых деформациях станка получаемой с помощью специальных измерительных преобразователей, установленных на станке. Данный способ получения информации

позволяет проводить коррекцию систематической и случайной составляющих погрешностей от тепловых деформаций. Однако необходимость установки на станке специальных измерительных преобразователей усложняет его конструкцию, особенно когда станочные измерительные преобразователи устанавливаются в рабочую зону, а также затрудняет получение непосредственной информации о смещениях из-за тепловых деформаций.

Практически компенсация тепловых деформаций станка может проводиться различными путями:

а) воздействием на управляющую программу, когда производится ее предсказание на основе информации о систематических погрешностях;

б) воздействием на управляющие сигналы, формируемые устройством ЧПУ и передаваемые на приводы исполнительных механизмов станка, т.е. путем коррекции управляющих сигналов;

в) использованием на станке специальных корректирующих элементов или устройств оснащенными микроприводами, которые управляются от системы ЧПУ станка.

На рис. 2 показана схема коррекции тепловых деформаций рабочих органов станка. Коррекция величины смещения рабочего органа станка равна по величине и обратна по знаку корректируемой температурной деформации.

Компенсация тепловых деформации сложная научно-техническая задача требующая наличия специальных измерительных систем, устанавливаемых часто в рабочей зоне станка и осуществляющих постоянное измерение величины тепловых смещений рабочих органов и исполнительных механизмов, температуры нагрева и других параметров

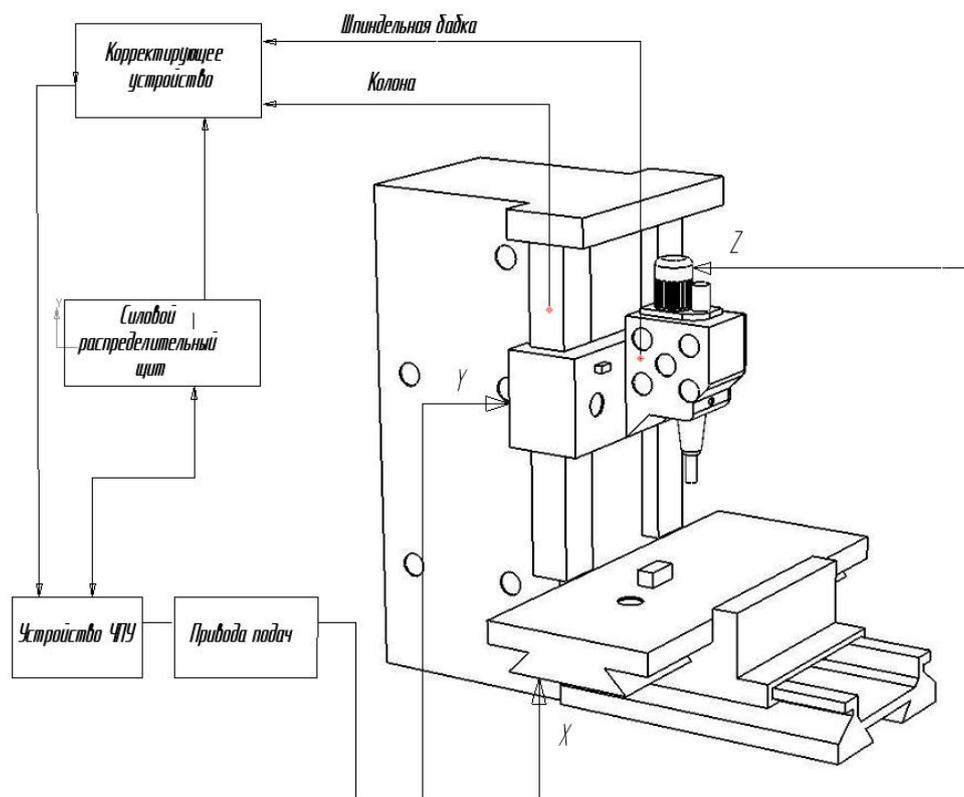


Рис. 2. Схема коррекции тепловых деформаций станка

Литература

1. *Проников А.С.* Параметрическая надежность машин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002 – 560 с.
2. *Проников А.С., Утенков В. М., Дмитриев Б. М., Ягопольский А.Г.* Надежность станков и машин // Труды Кафедры МТ-1. Кафедре «Металлорежущие станки» - 70 лет: Сб. статей / Под ред. Г.Н. Васильева. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000. – С.17-21.
3. *Васильев Г.Н., Ягопольский А.Г.,Тремасов А.П.* Проблемы диагностики и обеспечения надежности металлорежущих станков // СТИН. – 2003.- №7. – С. 14-17.
4. *Пуш В.Э.* Конструирование металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1977, 390 с.
5. *Стародубов В.С., Шаповалов А.Б.* Формирование погрешности металлорежущих станков с ЧПУ и пути их снижения . Известия ВУЗов. Серия «Машиностроение», №1, 1985, с. 125-130.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ СТАНКОВ ФРЕЗЕРНОЙ ГРУППЫ.

Александр Сергеевич Клецов⁽¹⁾, Игорь Павлович Иванов⁽²⁾

*Студенты 5 курса,
кафедра «Литейные технологии»⁽¹⁾, кафедра «Металлорежущие станки»⁽²⁾,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: А.Г. Ягопольский,
старший преподаватель кафедры «Металлорежущие станки»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Одной из основных задач, стоящих перед машиностроителями, является обеспечение качества изготовления, зависящее от надежности металлорежущего оборудования. В настоящее время наиболее перспективным и важным представляется методика расчетов параметрической надежности, направленная на уменьшение интенсивности протекания изнашивания, созданием отказоустойчивых конструкций с компенсацией возникающих погрешностей. Программы расчета либо универсальны, либо с минимальными изменениями подходят для исследования различных станков.

Для экспериментальной проверки методики оценки параметрической надежности был рассмотрен фрезерный консольный вертикальный станок ГФ2171С5 с УЧПУ. Станок предназначен для многооперационной обработки разнообразных деталей сложной конфигурации из стали, чугуна, цветных и легких сплавов. Наряду с фрезерованием на станке можно производить сверление, зенкерование, развертывание и растачивание отверстий, связанных координатами.

Кинематическая схема станка характеризуется наличием отдельных кинематических групп основного и вспомогательного движений. Шпиндельная головка имеет свой кинематический узел главного движения с отдельным приводом от асинхронного двигателя. Изменение частоты вращения главного движения производится за счет переключения блоков шестерен в кинематической группе. Кинематические цепи подачи по осям X, Y, Z имеют индивидуальные механизмы подачи

от электродвигателей постоянного тока. Кинематическая цепь установочного перемещения консоли имеет привод от синхронного двигателя.

Рассматривая параметрическую надежность данного состояния станка без учета износа, можно получить заключение о пригодности станка для обработки определенной заданной детали, оценить степень влияния на исходную точность различных узлов и механизмов станка, выработать рекомендации по установке детали на столе станка (выявить зоны стола, где обработка будет более точной) и т.д.

В качестве выходного контролируемого параметра рассмотрим точку на режущем инструменте (износ инструмента учитывать не будем, полагая, что размеры его не изменяются), в которой фактически происходит процесс резания, и будем рассматривать абсолютное смещение фактической точки, в которой производится обработка, от идеальной, заданной технологией обработки, программой УЧПУ в результате изменения случайных аргументов (нагрузки и их колебание вследствие изменения припуска на обработку, величины перемещения рабочих органов и т. д.), влияющих на отклонение рассматриваемого параметра. Рассмотрев совокупность точек, характеризующих абсолютное отклонение фактической траектории движения рабочих органов от идеальной и оценив нахождение их в пределах поля допуска, либо выполнение других специфических для данной детали требований, можно судить о возможности использования данного станка для обработки этой детали.

В непосредственном формировании сложного профиля детали на рассматриваемом станке участвуют два привода (вследствие конструкции станка и применяемой системы ЧПУ) - привода подачи по осям X и Y . Для исследования абсолютных смещений по каждой из рассматриваемых осей были составлены структурно-конструктивные схемы возникновения погрешностей по каждой из координат, включающие в себя все элементы конструкции, оказывающие влияние на смещение точки фактической обработки.

Все элементы станка обладают начальной точностью. При приложении нагрузок в каждом из выделенных нами элементов возникают упругие деформации, которые в конечном итоге приводят к смещению на определенную величину регламентируемого параметра по координате X . Кроме того, в ходе работы станка на него действуют быстротекущие процессы, процессы средней и малой скорости, которые также вызывают отклонения исследуемого параметра.

В итоге, общее смещение по координате X можем задать следующим образом:

$$\delta_{\Sigma X} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \delta_{Xij},$$

Определив аналогичным образом общее смещение по координате Y :

$$\delta_{\Sigma Y} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \delta_{Yij},$$

можно определить абсолютное отклонение контролируемой траектории в любой ее точке: $\delta = \delta_{\Sigma X}^2 + \delta_{\Sigma Y}^2$ и сделать вывод о пригодности станка для обработки данной детали.

Доля контактных деформаций подвижных и неподвижных стыков в балансе упругих смещений, возникающих в станке, может составить до 70 % при различных видах нагружения. Величина ее зависит от положения стыка относительно точки обработки и центров тяжести, углов наклона плоскости стыка относительно

направления действия силы резания и центров тяжести элементов, взаимного расположения направляющих площадок контакта в стыках, размещения точки приложения тягового усилия. От перечисленных факторов зависят величина и распределение давлений на гранях направляющих, а также суммарная сила трения в подвижных стыках.

При рассмотрении нагружения плоских стыков направляющих скольжения для оценки контактных перемещений использована эмпирическая зависимость $\delta = C\sigma^m$, где δ - контактное перемещение в мкм, σ - давление в направляющих, C - коэффициент, зависящий от геометрии поверхности и свойств материалов, m - показатель степени.

Для расчета элементарных смещений по каждой направляющей необходимо знать характер эпюры давлений между гранями направляющих. Эпюра имеет вид трапеции, причем ее форма зависит от смещения $X_{гi}$ точки приложения реакции относительно середины направляющей. В этом случае эпюра линейна, и наибольшие и наименьшие значения давлений можно определить по формулам:

$$p_{\max} = \frac{R_i}{LH} \left(1 + \sigma \frac{X_{Ri}}{L}\right) \quad p_{\min} = \frac{R_i}{LH} \left(1 - \sigma \frac{X_{Ri}}{L}\right),$$

где L и H - длина и ширина направляющих. Следует отметить, что (при $X_{гi} > L/6$) получается раскрытие стыка, что приводит к снижению площади касания, увеличению давлений в стыке и, как следствие, к большим контактным деформациям. Таким образом, для правильного определения смещения точки обработки необходимо найти реакции, действующие с стыках направляющих, и координаты их приложения.

В ходе обработки при перемещении стола по направляющим на него действуют составляющие силы резания (P_x, P_y, P_z), сила тяги Q и сила тяжести

Г. В результате действий этих внешних сил в направляющих возникают реакции, определяющие эпюры давлений и силу трения в каждой направляющей. Для определения неизвестных реакций рассмотрим по отдельности каждый из стыков (направляющие по оси X , направляющие по оси Y , направляющие установочного движения консоли). Оси координат направим в соответствии с ГОСТ 23587-79, а начало координат поместим в точке пересечения линий действия двух реакций, по длине - в середине направляющих. Для нахождения реакций используем 6 уравнений статики:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Sigma X = 0 \\ \Sigma Y = 0 \\ \Sigma Z = 0 \\ \Sigma M_x = 0 \\ \Sigma M_y = 0 \\ \Sigma M_z = 0 \end{array} \right.$$

Анализ расчетной схемы показал:

- направляющие по оси X: направляющие типа "ласточкин хвост", в результате записи уравнений статики получается трижды неопределимая задача (9 неизвестных: $R_1; X_{R1}; R_2; X_{R2}; R_3; X_{R3}; R_4; X_{R4}; Q$). Для решения системы необходимо введение дополнительных условий, связывающих искомые неизвестные между собой. Эти уравнения можно получить из условия совместности деформаций. Так как стол принимается нами жестким, не подвергающимся кручению, то при рассмотрении его поворота в плоскости XOZ под действием приложенных нафузок эпюры давления

должны быть подобны, а при рассмотрении его поворота в плоскости XOY под действием приложенных нагрузок эпюры давления должны быть симметрично подобны, что означает равенство по модулю тангенсов угла наклона эпюр и в итоге численно выражается как $R_1 X_{R1} = R_2 X_{R2}$; $R_3 X_{R3} = -R_4 X_{R4}$, таким образом получено два дополнительных уравнения, однако поскольку получение последнего уравнения для связи всех неизвестных технически сложно, то принято допущение, позволяющее сократить два неизвестных в системе уравнений. Предлагается следующее: при рассмотрении системы сил, действующих в плоскости ZOY , действие сил P_y , P_z и G уравновешивается тремя из четырех реакций, т.е.

если $P_y > 0$ $M(P_y) > M(P_z; G)$, то $R1 = 0$,
 если $P_y > 0$ $M(P_y) < M(P_z; G)$, то $R3 = 0$;
 если $P_y < 0$ $M(P_y) > M(P_z; G)$, то $R2 = 0$;
 если $P_y < 0$ $M(P_y) < M(P_z; G)$, то $R4 = 0$,

Это допущение нельзя назвать абсолютно корректным, так как в результате поворота стола относительно оси XOY нельзя говорить о полном отсутствии реакции $R3$, однако в нашем случае, при рассмотрении реакций, точки приложения которых отстоят на незначительное расстояние от центра направляющих, оно допустимо. Использование указанных допущений и одного из уравнений $R_1 X_{R1} = R_2 X_{R2}$; $R_3 X_{R3} = -R_4 X_{R4}$ позволяет найти реакции, а следовательно, давления и смещение точки обработки по осям X и Y .

-направляющие по оси Y : направляющие прямоугольные, система статически неопределима, решение производится аналогично направляющим по оси X .

-направляющие консоли: направляющие типа "ласточкин хвост", расчет производится аналогично направляющим по оси Y с учетом направления силы резания и моментов.

Деформации в шарико-винтовой паре определим по формулам Герца-Беляева, наибольшие деформации при этом возникают в контакте шарик-винт; Контактные перемещения:

1. в направлении действия нагрузки
$$\delta = c_1 P^{\frac{2}{3}} \text{ [см]}$$

2. в осевом направлении
$$\delta_0 = \frac{2\delta}{\sin \alpha \cos \lambda}$$

3. P - -----
$$P = \frac{Q}{Z_{pac} \sin \alpha \cos \lambda}$$
 нормальная

нагрузка на один шарик, кг;

E - модуль упругости материала сжимаемых тел, $\frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$

$$c_1 = \frac{m_\delta}{E^{\frac{2}{3}}} \sqrt[3]{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}}$$

$$m_\delta = (1,41 - 1,17(1 - \frac{1}{r_1})(1 - \frac{1}{r_2} \cos \alpha))^2$$

Полученная математическая модель используется для расчета параметрической надежности обработки кулачка. Для этого на траектории обработки кулачка выбирается несколько контрольных точек, характеризующихся различным направлением действия сил резания, припуском. Для каждой из выбранных точек производится 150 циклов вычислений отклонения точки обработки от идеальной траектории по осям X и Y, с входными данными оценить вероятность обработки детали с заданной точностью, а также достоверность приблизительных расчетов. Анализ отдельных составляющих смещений по координатам позволяет численно оценить влияние внесения изменений в конструкцию станка.

На основании практического применения методики прогнозирования параметрической надежности при помощи ЭВМ был произведен расчет для конкретного станка, позволяющий оценить точность обработки детали любой конфигурации, вероятность обработки детали с заданной точностью или любые другие интересующие параметры. Методика может быть применена к любому станку, в т.ч. и проектируемому, для составления математической модели и последующих вычислений необходимы данные о конструкции и режимах работы, непосредственно влияющих на интересующие выходные параметры.

Литературы

1. Под общ. редакцией *А.С. Проникова* "Проектирование металлорежущих станков и станочных систем" Справочник-учебник в трех томах - М. Издательство МГТУ/Машиностроение, 1994
2. Под ред. *Проникова А.С.* "Металлорежущие станки и автоматы" - М.: Машиностроение, 1981
3. *А.С. Проников.* "Надежность машин" -М. Машиностроение, 1973
4. *А.С. Проников.* "Программный метод испытания металлорежущих станков" - М. Машиностроение, 1985
5. *З.М. Левина, Д.Н. Решетов* "Контактная жесткость машин" – М.: Машиностроение, 1971
6. *И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич.* "Расчет на прочность деталей машин" - М. Машиностроение, 1993
7. *Д.Н. Решетов, В.Т. Портман* "Точность металлорежущих станков" - М.: Машиностроение, 1985
8. *Проников А.С.* "Концепция прогнозирования параметрической надежности машин" - Вестник МГТУ Сер.Машиностроение 1991 №3
9. *Проников А.С.* "Метод оценки случайных функций по установленным признакам (для инженерных расчетов)" - Вестник МГТУ Сер. Машиностроение 1994 №2
10. *Ю.В.СХомяков, И.В Тарасов* "Оценка влияния стыков' на точность станков" - "Станки и инструмент" 1991 №7

УДК 681.586

ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ «КНС» И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В СТАНКОСТРОЕНИИ.

Любовь Викторовна Кабакова

*Студентка 5 курса,
кафедра «Металлорежущие станки»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Ю.В. Никулин,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Темой доклада является рассмотрение тензорезисторных преобразователей «КНС» (кремний на сапфире) и их применение в станкостроении. Перед нами стоял вопрос измерения малых перемещений и смещений в станках.

В настоящее время метод тензометрии получил широкое распространение и развитие в станкостроении. Тензорезисторный преобразователь-это проводник, изменяющий свое сопротивление при деформации сжатия-растяжения.

При создании новых приводов станков ни одна из фирм мира не обходится без экспериментов по определению нагрузок в элементах привода (ходовом винте, муфтах, динамометрических столах и т.д.), напряженного состояния в роторах и статорах электродвигателей, подшипниках в опорах и т.д.

Благодаря малогабаритности, высокой точности измерения и помехоустойчивости метод тензоизмерений имеет большое значение при экспериментальных исследованиях станков.

Открытие и исследования тензорезисторного принципа, возникающего в полупроводниковых материалах (Si, германий и т.д.), показало, что созданные на этой основе датчики могут применяться при создании современных металлорежущих станков.

Принципиально новые возможности в развитии тензорезисторной аппаратуры для исследования механизмов, открылись в связи с разработкой и изучением гетероэпитаксиальных полупроводниковых структур типа «кремний на сапфире» и применением их в датчиках усилий или перемещения. Распространено получение полупроводниковых материалов в виде монокристаллических пленок на разного рода монокристаллических подложках. Такие пленки называют эпитаксиальными, а процесс их получения-эпитаксиальным наращиванием. Если эпитаксиальная пленка наращивается на подложку того же вещества, то получаемые структуры называют гомоэпитаксиальными. Если подложка из другого материала, то - гетероэпитаксиальные. Однослойные пластины кремния р- и n-типов получают резкой слитков монокристаллического кремния диаметром 50...150 мм на пластины толщиной 0,25...0,4 мм. Промышленностью выпускаются слитки монокристаллического кремния, которые в зависимости от типа электропроводности и значения удельного сопротивления подразделяются на пять групп. Подготовка пластин, получаемых из слитков монокристаллического кремния, является одним из важнейших этапов производства и включает в себя следующие операции: ориентацию слитков по кристаллографическим осям, резку слитков на пластины, шлифование, полирование,

травление и очистку поверхностей от загрязнений различных типов, приобретённых на предыдущих этапах обработки.

Обязательным условием получения бездефектных полупроводниковых и пленочных структур является отсутствие на поверхности пластин и подложек нарушенного слоя и каких-либо загрязнений. Как известно, нарушенный приповерхностный слой полупроводниковых пластин является следствием их механической обработки. Используемые при подготовке пластин методы шлифования, полирования и травления позволяют удалить нарушенный слой.

На тонкой монокристаллической пленке кремния, выращенной на монокристаллической сапфировой подложке с определенной кристаллографической ориентацией, расположена тензочувствительная схема, в которой тензорезисторы имеют вид мезаструктур, отделенных друг от друга промежутками чистого сапфира. Толщина кремниевой пленки варьируется от долей микрометра до 1...2 микрометров. Датчики на структуре КНС работают на нано-миллиметровом принципе, позволяющем давать высокий выходной потенциал при малых силовых возмущениях. Тензопреобразователи на основе структуры КНС обладают всеми достоинствами проволочных преобразователей.

Метрологические характеристики тензорезисторного датчика определяются главным образом параметрами его основной части - тензопреобразователя (ТП), осуществляющего преобразование измеряемой механической величины в выходной электрический сигнал. Недостатком полупроводниковых тензопреобразователей являются сильная и нелинейная температурная зависимость таких характеристик, как тензочувствительность и сопротивление тензорезисторов, и нелинейность функции преобразования деформации в относительное изменение сопротивления тензорезисторов. Для борьбы с этими недостатками разработано большое количество конструктивных и схемных методов компенсации погрешностей ТП, позволяющих изготавливать в настоящее время датчики, работающие в интервале температур от -50 до +125 °С с основной погрешностью 0,5% и дополнительной температурной погрешностью 0,1...0,4% на каждые 10°С. Вместе с тем, трудоемкая индивидуальная настройка датчиков, необходимая для получения высоких метрологических характеристик, повышает их стоимость и ограничивает объем производства.

Также к недостаткам широко используемых в последние годы интегральных кремниевых систем следует отнести необходимость формирования в них р-п - переходов, изолирующих тензорезисторы друг от друга и от подложки. Наличие р-п - переходов ограничивает верхнее значение рабочей температуры величиной 130...150°С (для кремния), понижает стабильность характеристик датчиков, не позволяет обеспечить высокую радиационную стойкость. Указанные недостатки обусловили ограниченность применения полупроводниковых тензорезисторных датчиков в современных системах контроля и управления технологическими процессами, хотя объем производства таких датчиков за рубежом непрерывно растет, что связано, в первую очередь, с массовым потреблением не очень точных, но сравнительно недорогих тензорезисторных датчиков автомобильной промышленностью.

Детальные исследования особенностей электрофизических характеристик и тензоэффекта в структурах КНС показали, что на их основе можно создавать тензопреобразователи с малой температурной погрешностью и высокой линейностью преобразования.

Рассмотрим для наглядности более подробно конструктивное исполнение транзисторов, выполненных по технологии кремния на изоляторе.

Подложка, выполненная по технологии кремний на изоляторе, представляет собой трёхслойный пакет, который состоит из монокристаллической кремниевой пластины, диэлектрика и размещённого на нём тонкого поверхностного слоя кремния. В качестве диэлектрика может выступать диоксид кремния SiO_2 или, гораздо реже, сапфир (в этом случае технология называется «кремний на сапфире» или КНС). Дальнейшее производство полупроводниковых приборов с использованием полученной подложки по своей сути практически ничем не отличается от классической технологии, где в качестве подложки используется монокристаллическая кремниевая пластина.

При построении схемы по данной технологии большая часть потребляемой мощности затрачивается на заряд паразитной ёмкости изолирующего перехода в момент переключения транзистора из одного состояния в другое, а время, за которое происходит этот заряд, определяет общее быстродействие схемы.

Основное преимущество технологии КНС состоит в том, что за счёт тонкости поверхностного слоя и изоляции транзистора от кремниевого основания удаётся многократно снизить паразитную ёмкость, а значит и снизить время её зарядки вкуче с потребляемой мощностью.

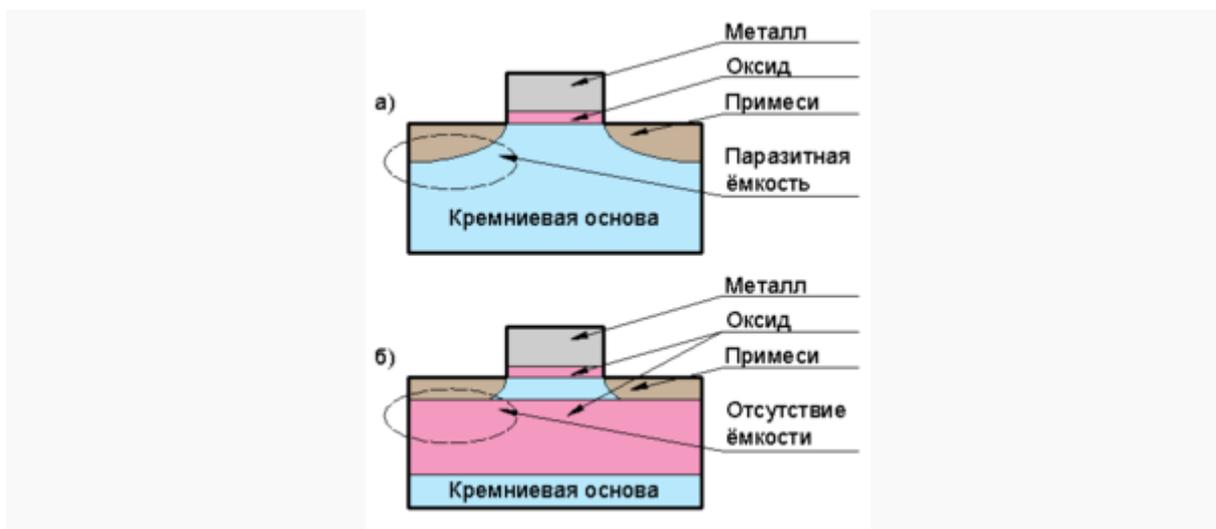


Рис. 1. Наноструктура КНС- датчика для измерения малых высокочастотных параметров станка (б - показан (розовым цветом) слой диэлектрика(сапфира или SiO_2))

Кроме всего вышперечисленного, тензорезисторные преобразователи на основе структуры КНС обладают целым рядом важнейших преимуществ, поскольку изготавливаются на основе интегрального кремниевого чувствительного элемента:

-упругий элемент таких полупроводниковых чувствительных датчиков может быть изготовлен из монокристалла кремния, так что в нем отсутствуют гистерезис и сопутствующие ему усталостные явления;

-тензорезисторы монокристаллично (на уровне атомов) связаны с упругим элементом, что исключает явления ползучести, характерные для слоев связующего клея;

-метод твердотельной технологии исключает появление низкой воспроизводимости характеристик датчика при массовом производстве их;

-датчики на основе КНС позволяют работать при измерении довольно больших перемещений и усилий, поскольку сапфир прочнее и жестче кремния и в принципе может выдерживать большой уровень деформаций;

-сапфир обладает отличными упругими и изолирующими свойствами (вплоть до температур порядка 1000 °С), что делает датчик на основе КНС работоспособным при высоких температурах (до начала пластических деформаций в кремнии, т.е. 700 °С);

-сапфир химически и радиационно исключительно стоек, поэтому элементы, выполненные из него, могут работать во всех агрессивных средах;

Тензорезисторные преобразователи на основе КНС работоспособны в самых жестких условиях эксплуатации узлов металлорежущих станков при широком интервале рабочих температур (открытое либо закрытое помещение, термокомпенсация и т.д.) и обладают повышенной надежностью и стабильностью параметров.

Все вышеперечисленное дает тензорезисторным преобразователям на основе КНС возможность быть использованными во многих отраслях промышленности.

Обычные тензодатчики не позволяют измерять малые перемещения. Они не «улавливают» его. Но станки такие существуют и даже применяются в полупроводниковом и электровакуумном машиностроении.

В ходе исследований нами было изучено множество конструкций тензодатчиков, индуктивных датчиков, емкостных. Каждый из них имеет свои недостатки. Так, например, датчики индуктивного типа не используются для малых перемещений. Емкостные очень сложны в исполнении. Они «боятся» высоких частот.

Рассмотрев все разнообразие существующих датчиков и преобразователей, мы остановились на КНС. Несмотря на преимущества и возможную перспективу использования тензорезисторных преобразователей, возникает проблема подключения датчика. Необходимо решить проблему - как и куда подключить датчик на основе структуры КНС, если он никогда и нигде не использовался в качестве тензочувствительного датчика. Для этой цели пришлось изготовить и исследовать отдельный стенд, наглядно демонстрирующий возможности установки этих тензодатчиков в станке.

Кроме того, сложно добиться сбалансированности моста (равенства комплексных сопротивлений в плечах мостовой схемы). Для уравнивания мостовой схемы переменного тока нужно вручную (или автоматически) регулировать параметры как модуля, так и фазового угла. Мостовой схемой переменного тока, применяемой в исследованиях станков, принято называть четырехполюсник, к двум выводам которого подводится питающий его переменный ток, а к двум другим (на выходе) подсоединяется указатель равновесия (например, цифровой вольтметр). В плечи моста включаются ППИ. Плечи четырехполюсника строятся таким образом, чтобы при изменении одного или нескольких параметров ППИ можно было добиться равновесия моста (отсутствие сигнала на выходе четырехполюсника).

ППИ - первичные преобразователи информации. В настоящее время имеется большое число пособий по экспериментальным методам исследования машин, в которых излагаются требования к конкретной аппаратуре и ППИ. Однако вопросами обоснования выбора ППИ, расчета схем ППИ для металлорежущих станков уделено чрезвычайно малое влияние.

Комплексные сопротивления, образующие ветви моста, могут быть соединены в схему различным образом и указатель равновесия может быть подключен к различным точкам схемы. Все это вызывает необходимость отыскать правильную конфигурацию цепей схемы.

Мостовые схемы, являющиеся частью схем первичных преобразователей информации, известны давно. В станкостроении существует два вида подключения

ППИ в измерительной аппаратуре-индивидуально или в виде мостовой схемы, обеспечивающей высокую чувствительность и малые габариты. С помощью мостовых схем в станкостроении измеряются многие неэлектрические величины: давление, виброперемещение, скорости, ускорения и др.

Существуют также другие разновидности мостовых схем (мосты Максвелла, Хейя, Вина, Шерринга), которые позволяют по добротности схемы определять механические параметры. В настоящее время существует, в основном, три вида питания мостовых схем переменным током (рис. 2).

В первом случае мостовая схема питается с помощью соответствующего генератора переменного тока (рис. 2, а). При изменении зазора x выходное напряжение генератора U делится на напряжение первое и второе с последующим уравновешиванием до получения равновесия.

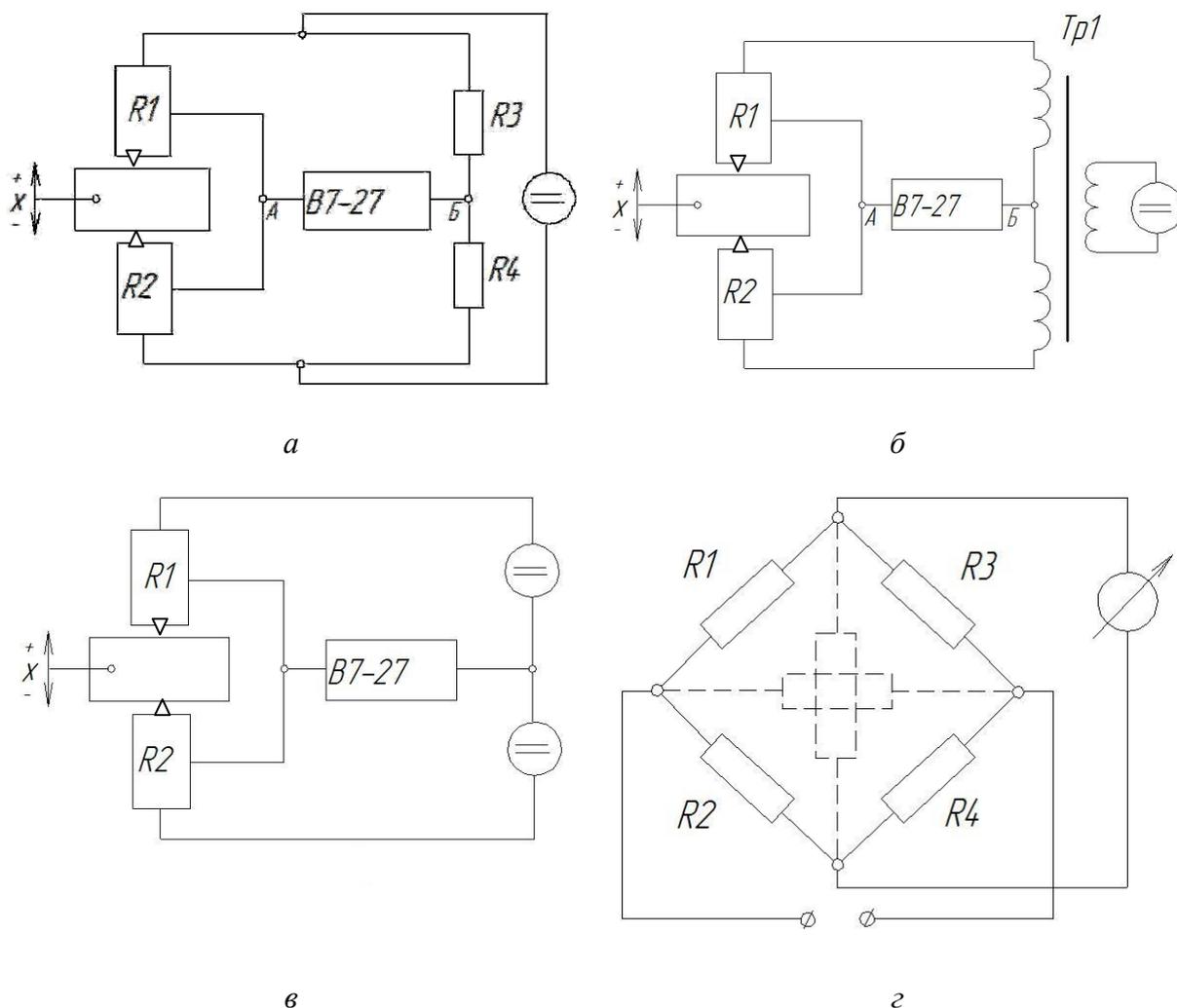


Рис. 2. Виды питания дифференциальных мостовых схем:
 а - с помощью генератора переменного тока;
 б - с помощью трансформатора с отдельными вторичными обмотками;
 в - напряжения формируются двоящим генератором переменного синусоидального напряжения; г - питание тензорезисторного датчика КНС постоянным током

При питании мостовой схемы, построенной на основе моста Максвелла, напряжения могут быть получены с помощью трансформатора с отдельными вторичными обмотками (рис. 2, б) (при питании мостовой схемы на основе структуры КНС от переменного напряжения). Основным достоинством таких схем, что очень важно для прецизионного станкостроения, является высокая точность исследования (например, зазора), а также значительная временная и температурная стабильность.

Для питания мостовой схемы могут также применяться стандартные электронные генераторы синусоидальных сигналов. Такая мостовая схема представлена на рис. 2, в, где напряжения формируются сдвоенным генератором переменного синусоидального напряжения. Основным требованием к данной мостовой схеме является жесткая связь выходного сигнала генератора с параметрами ППИ.

В созданной установке была учтена несбалансированность моста и возникновение новых сопротивлений в диагоналях моста.

Таким образом, в статье раскрыты все особенности, преимущества и недостатки тензорезисторных преобразователей «КНС». Наличие большого числа преимуществ увеличит возможности их применения и объем производства.

Литература

1. Никулин Ю.В. Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления. Материалы XVI Научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов под редакцией профессора В.Н. Азарова. - М.: МГИЭМ, 2004. -355 с.

2. Дайчик М.Л., Ригоровский М.И., Хушудов Г.Х. Методы и средства натурной тензометрии. - М.: Машиностроение, 1989. -240с.

УДК 621.9-18

РАЗРАБОТКА ТЕОРИИ ТЕПЛОВЫХ СМЕЩЕНИЙ, ПОЗВОЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМО АНАЛИЗИРОВАТЬ ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ НА ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ НА СТАНКЕ

Светлана Валерьевна Лаврова, Константин Александрович Герасимов

Студенты 5 курса,

кафедра «Металлорежущие станки»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.Г. Шишов,

аспирант первого года обучения, кафедра «Металлорежущие станки»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

1. Введение.

В области станкостроения наблюдается постоянное ужесточение требований к точности обработки на станках. Станки должны быть точнее и производительнее, что является главным их функциональным качеством. В связи с этим перед инженерами встает задача поиска новых решений в конструкции, технологии обработки, сборки, автоматизированном управлении станком.

Наибольший потенциал в повышении точности станков даёт расчёт и анализ точности работы конструкции на стадии проектирования, потому что эта работа открывает наибольшие возможности по воздействию на факторы, снижающие точность обработки. Остальные методы повышения точности станка, основанные на технологии обработки, особенностях управления станком и т.д., ограничены в возможностях повышения точности станка физическими свойствами самой конструкции станка.

В настоящее время процесс проектирования конструкции не связан с точностью самого станка. Применяемые расчёты по большей части мало обоснованы. Как результат, создание конструкции станка и назначение требований к деталям и сборкам происходит в значительной степени или интуитивно, или на базе эмпирического опыта. Использование мощных пакетов конечно-элементного анализа типа Ansys, Nastran, Patran по сути позволяет заменить физический эксперимент виртуальным. Станок для инженера по-прежнему остаётся «чёрным ящиком», и повышение точности в таком случае остаётся интуитивным.

При расчёте точности на стадии проектирования и анализе влияния различных факторов и свойств конструкции на точность обработки крайне важен системный подход к конструкции. Необходима теория, которая представит станок как систему факторов, что позволит оценивать удельное влияние каждого фактора на точность станка и увязать процесс проектирования с обеспечением точности станка.

Согласно [1], статическую точность станков определяют три основные характеристики смещений: силовая, тепловая и размерная. Для силовой составляющей точности уже существует теория силовых смещений [1], в которой конструкция станка приводится к упруго-фрикционной системе — системе упругих и неупругих свойств конструкции, значения которых определяются шероховатостью стыков, усилиями затяжки, жёсткостью деталей и т.д.

2. Цели и задачи исследования.

В данном исследовании поставлена задача - разработать и обосновать теорию тепловых смещений в станке. В настоящее время существует множество работ, посвящённых расчёту тепловых смещений станков на стадии их проектирования. Работы последних лет преимущественно связаны с методом конечным элементов. С одной стороны, можно достаточно точно определить тепловую точность станка, построить поле температур, распределения тепловых смещений. Однако станок для инженера по-прежнему остаётся «чёрным ящиком», потому что удельное влияние отдельных факторов практически не определяется. Разрабатываемая теория должна связать отдельные факторы, влияющие на тепловые смещения, в систему. Т.к. силовые и тепловые процессы в реальной конструкции работают вместе, необходимо связать теорию силовых и тепловых смещений в единое целое.

Рассмотрим тело, которое лежит в углу некоторого недеформируемого основания (рис. 1). Левый край - свободное состояние, правый – касается стенки без усилия. Жёсткость тела в горизонтальном направлении – k . Пусть тело прижимается нижней плоскостью к основанию нормальной силой N . Будем равномерно медленно нагревать и охлаждать тело (график изменения температуры представлен на рис. 2). Нагрев и охлаждение тела происходит с низкой скоростью, чтобы процессы в системе носили статический характер. График изменения температуры тела представлен на рис. 2.

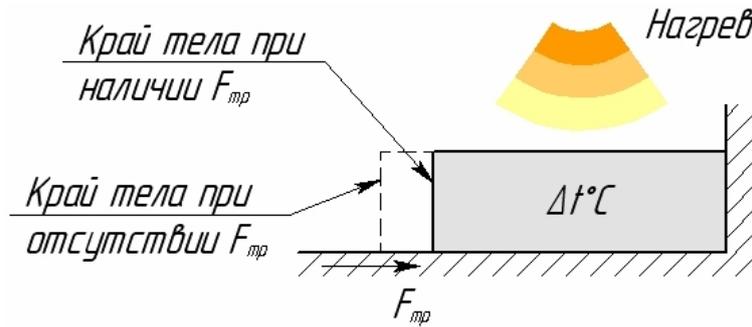


Рис. 1. Схема для анализа процесса формирования тепловых смещений в станке

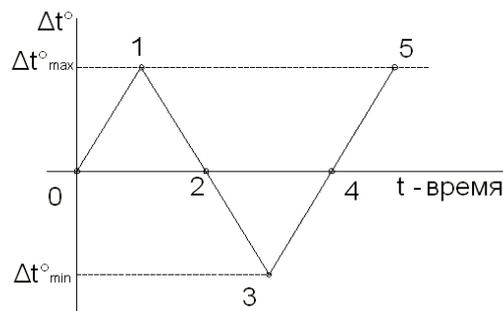


Рис. 2. График изменения температуры тела

По мере нагрева свободный край тела начинает смещаться. При движении левого края тела в стыке появляется сила трения, которая направлена против движения (вправо). Согласно третьему закону Ньютона, сила трения $F_{тр}$ должна быть уравновешена силой, равной ей по величине и направленной противоположно ей. Т.к. сила трения деформирует тело, уравновешивающей силой будет сила упругости $F_{упр}$ тела.

$$F_{упр} = F_{тр} \quad (1)$$

Таким образом, при нагреве тела появляются сразу две силы – $F_{тр}$, $F_{упр}$. Вначале при нагревании тела сила трения, сила упругости и сжатие тела будут увеличиваться. При этом край тела останется неподвижным, т.к. сжатие тела будет равно величине его удлинения вследствие нагрева. При достижении силой трения величины T , и при дальнейшем росте температуры величина силы трения останется неизменной. Сила упругости согласно третьему закону Ньютона, останется равной уже постоянной по величине силе трения. Следовательно, начиная с момента достижения силой трения величины T дальнейшее удлинение тела не встречает препятствий, и тело будет удлиняться так, как будто силы трения и силы упругости нет. Однако при этом тело будет оставаться в сжатом состоянии.

Рассчитаем значения силы трения $F_{тр}$ и силы упругости $F_{упр}$. Если бы не было силы трения, удлинение тела Δl при тепловом расширении составило бы:

$$\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta t \quad (2)$$

где Δl – удлинение тела при нагреве (охлаждении), мм
 α – коэффициент линейного расширения материала тела, $^{\circ}\text{C}^{-1}$
 l – начальная длина тела, мм
 Δt° – изменение температуры тела, $^{\circ}\text{C}$

Так как сила трения препятствует движению края тела, тело оказывается сжатым на Δl . Тогда сила упругости будет равна:

$$F_{упр} = k\Delta l \quad (3)$$

где k – жесткость тела, Н/мкм

Определим температуру, при которой наступают смещения тела. При указанной температуре сила трения достигает максимального значения:

$$F_{тр} = T \quad (4)$$

Используя уравнение (1), (2) и (3), получим:

$$\Delta t_T = \frac{T}{\alpha l_0 k} \quad (5)$$

На рис. 3 представлена зависимость смещений тела от величины его нагрева. Представленная графическая зависимость получила название характеристики тепловых смещений (ХТС) по аналогии с характеристикой силовых смещений из теории силовых смещений.

Участок 0-1 ХТС описывает смещения в начале нагрева. Как было сказано выше, край тела не смещается пока $\Delta l \cdot k < T$.

Участок 1-2 ХТС описывает смещения тела, когда $\Delta l \cdot k \geq T$. Для определения величины нагрева Δt° , при котором участок 0-1 ХТС переходит в участок 1-2, то есть начинается процесс смещения левого края тела.

Далее температура тела уменьшается, при этом тело начинает укорачиваться в длине. Однако, в связи с тем, что оно было сжатым (под действием силы трения в стыке), то сначала уменьшается степень сжатия тела $\Delta l \cdot k$. При этом сила упругости и сила трения уменьшаются при уменьшении степени сжатия тела.

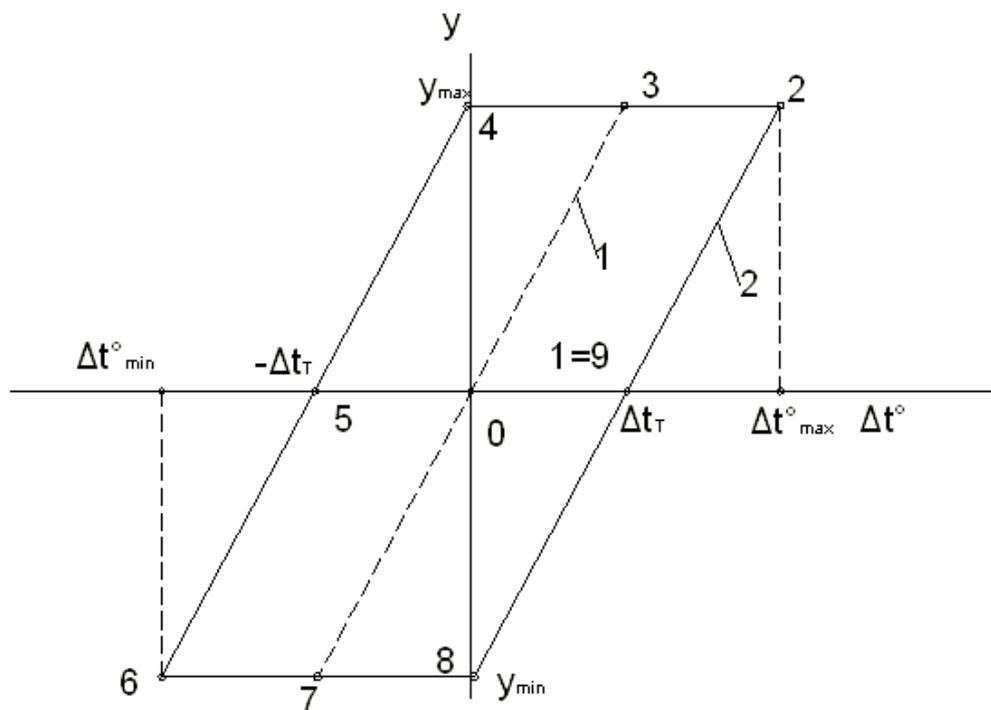


Рис. 3. Характеристика тепловых смещений

Процесс снятия напряжений в детали отображается на участке 2-3 ХТС. Точка 3 соответствует ненапряженному состоянию тела, когда $F_{упр}=k \cdot 0=0$ и $F_{упр} = F_{тр} = 0$. Участок 3-0-7 характеризует процесс тепловых смещений при отсутствии силы трения, показан пунктиром потому, что реальная система (рис. 1) имеет трение. При дальнейшем уменьшении температуры тела процесс, описанный выше, повторяется с тем отличием, что смещения уменьшаются, а тело, под действием внешней силы трения оказывается растянутым.

4. Методика построения ХТС.

Методика построения ХТС основана на том, что край тела находится в покое, когда силы трения и упругости равны между собой, и смещается, когда сила трения достигает максимальной величины T .

Исследование процесса смещения тела при тепловом нагружении и наличии стыка показало, что величина смещения состоит из двух составляющих:

$$y = \frac{F_{упр}}{k} + \Delta l \quad (6)$$

Т.к. сила упругости равна силе трения (см. уравнение (1)), представим уравнение (6) в следующем виде:

$$y = \frac{F_{тр}}{k} + \Delta l \quad (7)$$

Сила трения изменяется по следующему закону:

$$F_{тр} = \begin{cases} \Delta l \cdot k, & \Delta l \cdot k \leq T \\ T, & \Delta l \cdot k > T \end{cases} \quad (8)$$

При этом следует выделить следующий момент: край тела может либо двигаться, либо оставаться неподвижным. Когда край тела движется, сила трения равна T , в остальных случаях край тела остаётся неподвижным. Из такой особенности поведения системы следует методика построения ХТС.

При построении ХТС сначала выделяется область существования графика. Т.к. сила трения не может превысить T , а зависимость (6) при $F_{тр} = T$ носит линейный характер, то на оси температуры отмечаем точки с координатами $(\pm \Delta t_T^0, 0)$. Через эти точки проводим прямые, параллельные прямой $y = \frac{T}{k}$. В результате получим три области: в середине и границы — область существования ХТС, слева и справа — недопустимая область. На границе области существования графика сила трения = T , следовательно, только точки на границе соответствуют движению края тела. Точки внутри области существования соответствуют состоянию тела, при котором его край неподвижен.

Пусть у нас есть некоторая точка, к которой мы пришли в результате определённой последовательности тепловой нагрузки и разгрузки. И стоит задача определить поведение края тела при увеличении или уменьшении степени нагретости тела.

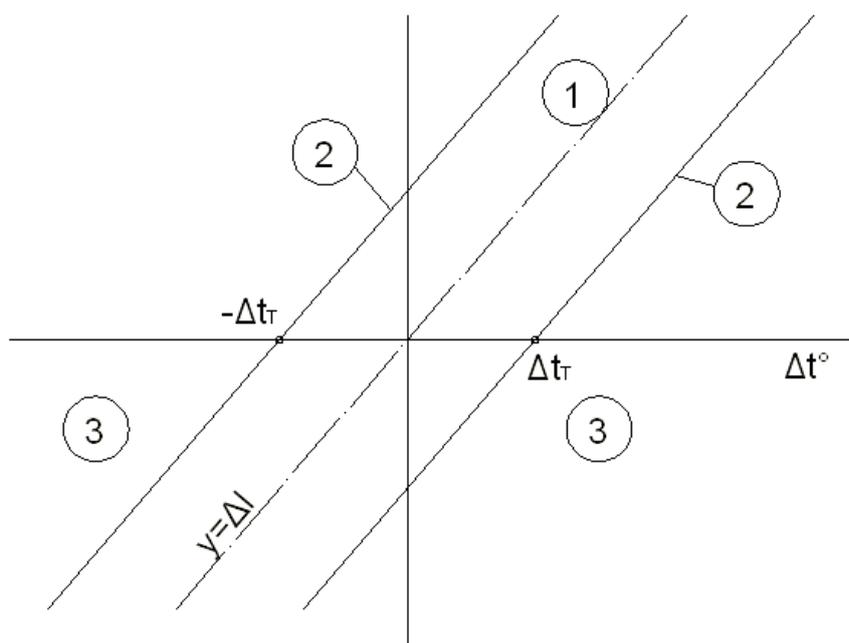


Рис. 4. Области существования характеристики тепловых смещений тела

Чтобы ответить на поставленный вопрос, необходимо через указанную точку провести горизонтальную прямую до пересечения с границами области существования ХТС. Данная линия характеризует отсутствие смещений при нагревании или охлаждении тела, когда выполняется условие $\Delta l \cdot k < T$. От точек пересечения данной линии с границами области существования ХТС сносим вертикальные линии на ось температуры — получаем $\Delta t_{\min}^{\circ} \dots \Delta t_{\max}^{\circ}$. Эти две линии определяют область на оси температуры, нагрев и охлаждение в пределах которой не вызывает смещения края тела. При дальнейшем повышении или понижении температуры график пойдёт соответственно вверх и вниз.

В итоге можно записать следующий алгоритм расчёта смещений при тепловом нагружении:

$$\begin{aligned} \Delta t_{\min} < \Delta t < \Delta t_{\max}^{\circ} &\rightarrow \Delta y = 0, \\ \Delta t < \Delta t_{\min}^{\circ} &\rightarrow y = \frac{T}{k} + \Delta l, \\ \Delta t > \Delta t_{\max}^{\circ} &\rightarrow y = \frac{-T}{k} + \Delta l. \end{aligned} \quad (9)$$

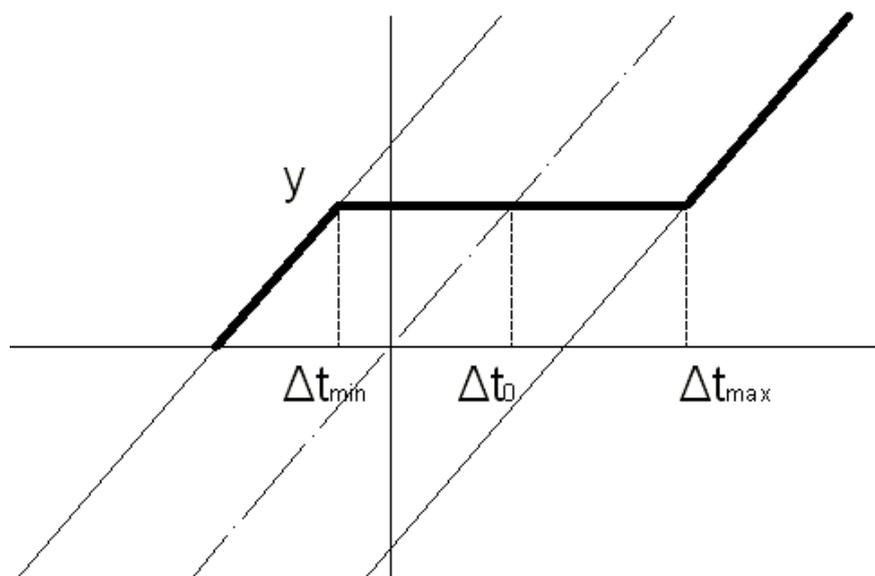


Рис. 5. Этапы построения характеристики тепловых смещений

5. Выводы.

При анализе поведения системы было замечено много схожего с процессом формирования силовых смещений. На основании данной схожести, а также в результате анализа процесса формирования смещения при тепловом нагружении и наличии стыков были сделаны следующие выводы.

1. При наличии стыков тепловые процессы сопровождаются как тепловыми, так и силовыми смещениями.

2. Суммарное смещение при нагреве тела складывается из суммы силовых и тепловых смещений (см. уравнение).

3. Сила трения будет влиять на суммарное смещение при тепловом нагружении.

4. Так как сила трения $F_{тр} = \Delta l \cdot k$ жесткость конструкции влияет на суммарное смещение при тепловом нагружении.

5. Так как вибрации влияют на $F_{тр}$, то наличие вибрации будет влиять на суммарное смещение u_{max} – увеличивать и уменьшать $2\Delta t$ (на рис. 3) благодаря связи тепловых смещений с силой трения.

6. При нагреве – участок 0-1-2 рис. 2 – возникают остаточные тепловые смещения, не связанные с наличием зазоров в системе.

7. С течением времени остаточные тепловые смещения могут быть сняты двумя путями - $\Delta t^{\circ}C \downarrow$ и вибрации ($F_{тр} \downarrow$) – практическая важность работы по исследованию.

8. Поведение силы трения не зависит от природы смещения тела.

9. Теорию тепловых явлений нельзя рассматривать без теории силовых смещений.

Литература

1. Чернянский П.М. Основы проектирования точных станков. Теория и расчёт. - М.: КНОРУС, 2010. - 240 стр.

2. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1977.

3. Кузнецов А.П. Тепловое поведение и точность металлорежущих станков. -М.: МГТУ Станкин, Янус-К, 2011, -256с.

УДК 53.084.823

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ

Михаил Юрьевич Чупов

*Аспирант 3 года,
кафедра «Информационные системы»,
Московский государственный технологический университет «Станкин»*

*Научный руководитель: П.М. Позднеев,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы»,
Московский государственный технологический университет «Станкин»*

В начале XX века основной тенденцией в различных отраслях машиностроения были автоматизация производственных процессов на базе их механизации, а также стандартизация и унификация, как самой изготавливаемой продукции, так и составляющих её деталей и сборочных узлов. В указанный период наблюдался активный переход от единичного производства к серийному и от серийного к массовому, технология и организация которого являлись наиболее передовыми и прогрессивными. Однако к середине XX века (после того, как массовым производством были удовлетворены потребности на продукцию машиностроения по основным видам изделий) появились факторы, снижающие эффективность массового производства. Так, в частности, произошли существенные изменения в структуре спроса и начался процесс усиленной дифференциации изделий по номенклатуре. Это повлекло за собой необходимость частой замены промышленного оборудования и изготавливаемой продукции.

В настоящее время до 75 % предприятий отечественного машиностроения выпускают продукцию, которая по своему характеру является серийной и мелкосерийной [1-4]. Ежегодно на каждом из таких предприятий выполняются десятки заказов на новые изделия, при этом номенклатура деталей, входящих в отдельные новые изделия, достигает 150 тысяч наименований и более.

Постоянно возрастающая номенклатура выпускаемых изделий с одновременным усложнением их конструкции и технологии изготовления вызывают необходимость использования для механообработки этих изделий станков с ЧПУ, т. к. в условиях серийного и мелкосерийного машиностроительного производства именно эти станки позволяют быстро перейти на выпуск новой продукции или её модернизацию при одновременном повышении производительности труда и снижении себестоимости производственного процесса.

Учитывая вышеизложенные обстоятельства и тенденции, можно констатировать, что проблема научно обоснованного выбора наиболее рациональных технологических условий осуществления фрезерной обработки деталей машин и механизмов на станках с ЧПУ, обеспечивающих повышение точности и качества этих деталей при одновременном повышении технико-экономических показателей производства является важной и актуальной, представляющей не только научный, но и значительный практический интерес. Этот интерес к указанной проблеме со стороны инженерно-технических работников предприятий неслучаен, т. к., судя по результатам теоретико-экспериментальных исследований, проведенных в последние годы, здесь

заложен мощный, но недостаточно используемый резерв дальнейшего повышения рентабельности машиностроительного производства.

В данной работе рассматривается один из аспектов вышеуказанной проблемы - вопрос научно обоснованного повышения точности фрезерной обработки материалов на станках с ЧПУ наиболее простым и доступным для производства способом: путем целенаправленной параметрической оптимизации режимных условий анализируемого процесса фрезерования с учетом накладываемых технико-технологических ограничений. На данном этапе производства для изготовления деталей составных частей космических аппаратов используется широкий ряд материалов, в том числе и изделия из сплавов алюминия, сплавов стали и титана. Точность изделий производимых в этих целях сопоставима с 7 классом точности. Зачастую имеет место мелкосерийное или индивидуальное производство, что обуславливает контроль всего цикла изготовления. Существует возможность изготовления изделий на токарно-фрезерном обрабатывающем центре, который способен выполнять все токарные и простые фрезерные операции (плоскости, лыски, пазы, шестигранники, и т. д). Разработка управляющих программ может происходить по протоколам Fanuc и HEIDENHAIN. Токарно-фрезерный центр может обеспечить достаточную точность изделия и практически полную повторяемость. Тем не менее, полностью исключить возможность ошибки в написании управляющей программы не представляется возможным, в связи, с чем предлагается разработать автоматизированную систему по управлению жизненным циклом изделия.

На точность изготовления изделия влияют факторы:

- Тепловой фактор при изготовлении
- Износ обрабатывающего инструмента (ресурс, время работы, хим. состав и т.д.)
- Погрешность настройки (Базирование) (На токарных станках несоосность)
- Биения-Вибрации Шпинделя (Фрезы)
- Существенное несоответствие заданным режимам обработки (например, частота вращения шпинделя (фрезы) текущему режиму)
- Неточность изготовления режущего инструмента
- Неточность 3D модели (Субъективная погрешность)
- Неверный выбор СОЖ
- Электромагнитное воздействие
- Влажность
- Наличие вызывающих коррозию веществ в зоне обработки
- Свойства обрабатываемого материала (коррозионная стойкость, состав, вязкость, пластичность, твердость и т.д.)
- Солнечная радиация

Этапы технологического цикла изделия необходимые для реализации автоматизированной системы:

- Изготовление детали на станке.
- Измерение детали на Координатно-измерительной машине (Измерительная информация записывается в электронном виде в формате .TXT)
- Корректировка управляющей программы по изготовлению детали, с учетом измерительных данных, в автоматическом режиме, с помощью разработанного ПО и САПР "ADEM".

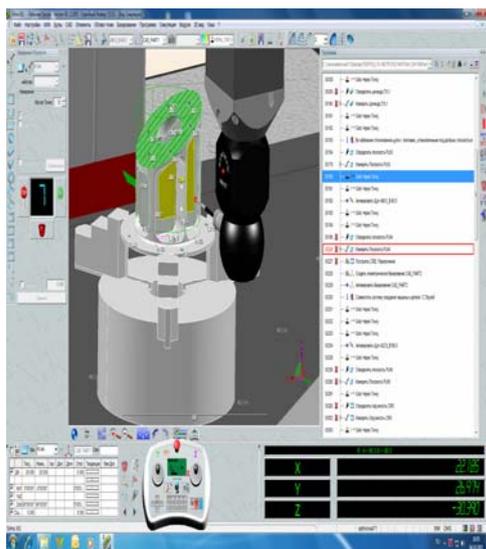


Рис.1. Рабочее окно в программном обеспечении MetrologXG

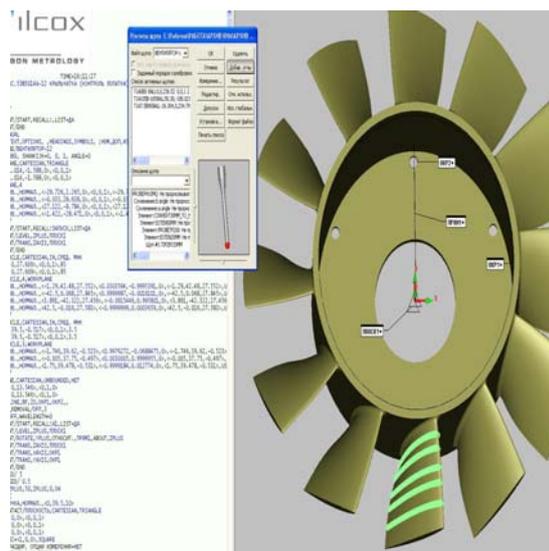


Рис.2. Рабочее окно в программном обеспечении PC-DMIS

Для достижения поставленной задачи были проведены анализ программного обеспечения для КИМ Hera-777 (MetrologXG) и КИМ Global (PC-DMIS), и анализ системы автоматизированного проектирования “ADEM”, посредством изучения комплекта документации по описанию программной среды и способов разработки программ.

На основе анализа документации сделан вывод о том, что язык программирования технологической среды PC-DMIS более низкого уровня, что дает возможность более корректно и полно решать широкий спектр задач, но менее удобно для пользователя.

В свою очередь на базе системы автоматизированного проектирования “ADEM” предлагается реализовать автоматизированную систему по управлению жизненным циклом изделия.

САПР “ADEM” обладает открытым программным ядром, что позволяет дополнять её программами, разрабатываемыми в других программных средах, это дает возможность дорабатывать управляющие программы, в автоматическом режиме, с учетом измерительных данных с КИМ.

Для этого предлагается разработать ПО на вход которому будет поступать протокол с измерительной информацией, об изделии контролируемым КИМ и управляющая программа (некорректная программа), разработанная в среде ADEM, на выходе управляющая программа, у которой исправлены все ошибки связанные с назначением неверных координат передвижения режущего инструмента, после чего такую программу можно будет продолжить отлаживать в ручном режиме, либо если точно известно, что других причин неверного изготовления детали нет, компилировать её через постпроцессор.

Постпроцессор – программа, которая переводит написанную технологом управляющую программу из языка системы ADEM на язык станка (Fanuc, HEIDENHAIN).

Таким образом, будет получена возможность увеличить потенциальное количество станков, к которым будет применима данная исправленная управляющая программа.

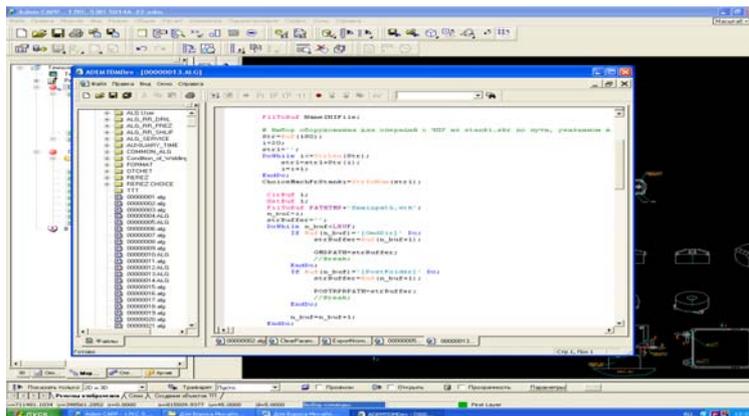


Рис.5. Пример программного кода постпроцессора в САПР ADEM

3D модель, исследуемого изделия. Рассматриваются 3 вида размеров:

- Диаметральный
- Линейный
- Угловой

Исследуемое изделие.

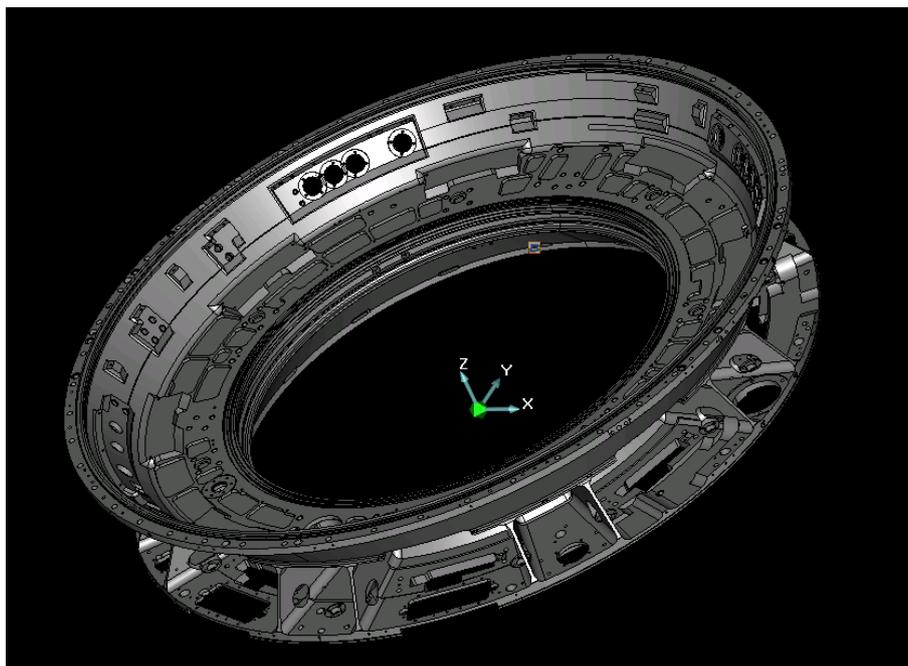
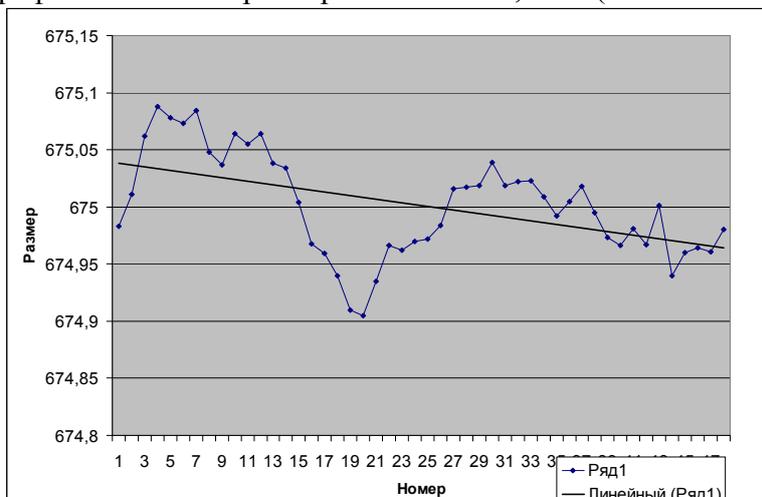


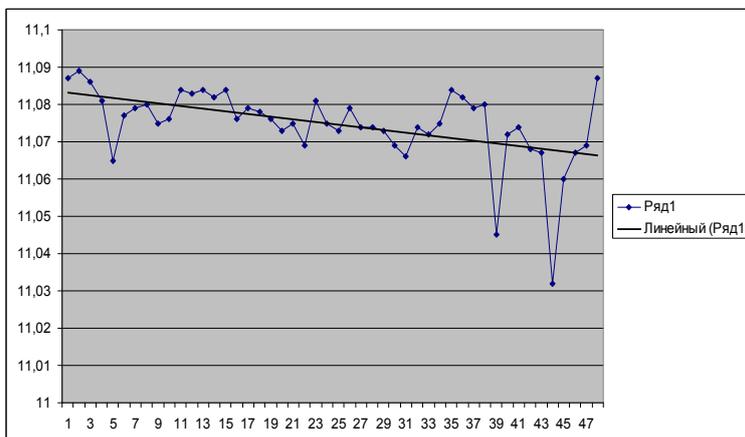
Рис.6. Исследуемое изделие

График зависимости количества размеров от значений, полученных на КИМ:

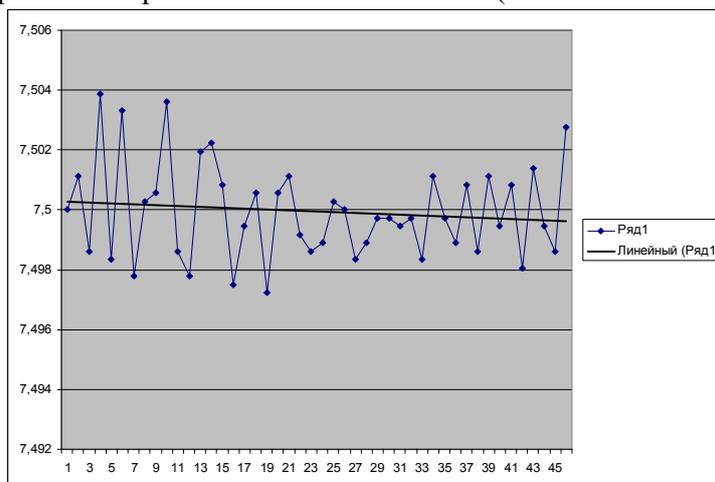
1. График линейного размера 675 мм. $\pm 0,1$ мм (количество: 48).



2. График отверстий $\text{Ø}11^{+0,24}$ мм.



3. Угловые размеры на отверстия М4-6Н $\angle 7^{\circ}30' \pm 3'$ (В абсолютных величинах)



Из полученных данных следует, что имеет место влияние систематической составляющей.

Литература

1. *Солонин И.С.* Математическая статистика в технологии машиностроения. 1960. – 35 с.
2. *Тихонов А.Н., Кальнер В.Д., В.Б. Гласко* Математическое моделирование технологических процессов и метод обратных задач в машиностроении. 1990.

УДК 621.941

НАРЕЗАНИЕ ХОДОВЫХ ВИНТОВ НА ТОКАРНО-ВИНТОРЕЗНЫХ СТАНКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРЕССИВНЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Илья Валерьевич Шемякин

*Студент 5 курса,
кафедра «Технологии машиностроения»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Л.И. Вереина,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Актуальными задачами технологии машиностроения является повышение производительности обработки при сохранении требуемой точности размеров и качества обработанной поверхности.

Режущий инструмент и станок являются теми средствами, без которых невозможно полностью достичь высоких производительности и точности обработки.

Применение новых инструментальных материалов и конструкций резцов позволяет, реализуя более высокие скорости резания, снизить износ резцов и увеличить период стойкости при обработке материалов, особенно труднообрабатываемых. К таким инструментальным материалам относятся:

– *твердые спеченные сплавы группы ОМ* (мелкозернистые сплавы), и наиболее эффективны для обработки труднообрабатываемых материалов твердые сплавы группы ХОМ, в которых карбид тантала заменен карбидом хрома (легирование сплавов карбидом хрома увеличивает их прочность при высоких температурах);

– *минералокерамические материалы*, основной частью которых является окись алюминия. Кроме того, в минералокерамику добавляют вольфрам, титан, тантал и кобальт. В промышленности применяют минералокерамику марки ЦМ-332, которая отличается высокой теплостойкостью (твердость 89...95 HRC при температуре 1200°C) и износостойкостью, что позволяет вести обработку при высоких скоростях резания (например, чистовое обтачивание чугуна при скорости резания 370 м/мин, что в два раза выше скорости резания при обработке твердосплавным инструментом). Недостатком минералокерамики марки ЦМ-332 является повышенная хрупкость;

– для обработки сталей твердостью 40...67 HRC применяют резцы, режущая часть которых изготовлена из *сверхтвердых материалов* (СТМ) [5]. К этой группе относятся материалы на основе нитрида бора — эльбор-Р, твердость которого приближается к твердости алмаза, а теплостойкость в два раза выше. Эльбор-Р

химически инертен к материалам на основе железа. Прочность поликристаллов на сжатие 4000...5000 МПа, на изгиб — 700 МПа, теплостойкость 1350...1450°С;

– *синтетические алмазы* типа баллас (марка АСБ) и типа карбонадо (марка АСПК). Карбонадо химически более активен к углеродсодержащим материалам, поэтому его следует применять для точения цветных металлов и высококремнистых сплавов. Стойкость резцов из карбонадо в 20 — 50 раз выше стойкости резцов из твердых сплавов.

Кроме того, в промышленности в настоящее время получило широкое распространение, для увеличения периода стойкости режущего инструмента из быстрорежущей стали, нанесение износостойких покрытий из карбидов вольфрама или нитридов титана.

Например, одним из новых способов повышения стойкости быстрорежущих сталей является их изготовление способами гидростатического и гидродинамического выдавливания, что увеличивает их стойкость в 1,5...2,5 раза.

Интерес представляет метод магнитной обработки быстрорежущих сталей, позволяющий значительно повысить период стойкости инструмента. Кроме того, вследствие магнитной обработки повышается твердость и пластичность режущего материала, а после переточки сохраняется повышенная стойкость. Длительность магнитной обработки — 10...180 с, частота импульсов не более 10 Гц. Наиболее совершенные установки для магнитной обработки имеют адаптивные системы управления, позволяющие автоматически изменять режим обработки в зависимости от размеров инструмента.

Повышение стойкости инструментов из быстрорежущей стали может быть достигнуто также методом термодиффузионного упрочнения [2], при котором на режущие поверхности инструмента за счет диффузии наносится слой хрома, молибдена или ванадия, обеспечивающими повышение твердости и износостойкости.

Существует ряд установок «Булат», служащих для нанесения износостойких покрытий на быстрорежущие и твердосплавные инструменты методом ионной бомбардировки. Материал покрытий (титан, молибден, бор и др.) испаряется и в среде азота конденсируется на инструменте, вследствие чего образуется пленка, например нитрида титана. При толщине пленки 5...7 мкм период стойкости инструмента повышается в среднем в 2...6 раз в зависимости от обрабатываемого материала и условий обработки. Широкое распространение получили многослойные покрытия, однако после каждой переточки покрытие нужно наносить заново.

Получает распространение повышение стойкости резцов покрытием дисульфидом молибдена [11], повышение стойкости при этом достигается в 2...2,5 раза. Самым простым способом нанесения такого покрытия является простое натирание режущего лезвия карандашом из дисульфида молибдена (предварительно натираемую поверхность необходимо обезжирить). Другой способ — окунание обезжиренной поверхности в жидкий дисульфид молибдена с последующим выдерживанием в печи при температуре 100...150°С. Этот способ также требует нанесения покрытия после каждой переточки.

Лазерное упрочнение быстрорежущих и других инструментальных сталей дает высокую твердость и стойкость за счет фазовых превращений металла поверхностного слоя на заданном участке инструмента. При этом свойства основного материала сохраняются неизменными.

При необходимости срезания больших припусков на деталях из высокопрочных и труднообрабатываемых материалов повышение производительности обработки и

стойкости инструментов может быть достигнуто за счет применения терморезания, т.е. обработки нагретой детали. В результате нагрева поверхностного слоя уменьшается его сопротивление резанию, снижаются нагрузки на инструмент, при этом в качестве режущего инструмента предпочтительнее использовать керамический или твердосплавный.

Нагрев заготовки может быть общим или локальным в зоне резания. Локальный нагрев может быть выполнен: токами высокой частоты (индукционный способ), электроконтактным способом (низковольтным переменным током, подводимым к заготовке специальными вращающимися роликами), инфракрасным излучением; электролитическим нагревом; плазменным нагревом. Нагрев плазменной струей дает возможность обрабатывать и токонепроводящие материалы, а нагрев электрической дугой – только токопроводящие.

Все это позволяет использовать высокие научно-обоснованные режимы резания, получая при этом высокую производительность обработки, сохраняя оптимальный период стойкости резца.

При нарезании резьбы с использованием прогрессивных режущих инструментов разработаны конструкции резцов с клеевым соединением режущей пластины и ее механическим креплением [6].

Имеется достаточный опыт применения новых прогрессивных режущих инструментов при обтачивании, растачивании, рассверливании, фрезеровании, протягивании и других видах обработки заготовок из металлов. Недостаточно опубликованы результаты внедрения прогрессивных инструментальных материалов при нарезании резьбы резцом, особенно на длинных ходовых винтах.

Одной из причин трудности внедрения прогрессивных режущих инструментов является то, что выпускаемые ранее модели токарно-винторезных станков (16К20, 1М620 и др.) были разработаны без учета возможностей работы резцов с высокими скоростями и большой глубиной резания: на токарно-винторезных станках нельзя было осуществить частоту вращения более 3000 мин⁻¹ и эффективную мощность резания более 10 кВт, а специализированные токарно-винторезные станки, например мод. 1622, предназначенные для нарезания резьбы на ходовых винтах длиной от 2500 до 5000 мм, имели максимальную частоту вращения заготовки 80 мин⁻¹ и мощность электродвигателя 4 кВт.

Задачей является определить область применения универсальных и специализированных токарно-винторезных станков для изготовления ходовых винтов с использованием прогрессивных инструментальных материалов.

В металлорежущих станках с ручным управлением отечественного производства применяются в основном ходовые винты с трапецеидальной резьбой диаметрами от 20 до 120 мм. При выполнении чистовой токарной обработки наружных поверхностей ходовых винтов предпочтительно выполнять лезвийную обработку [1, 7], так как она практически исключает термические повреждения обработанной поверхности (прижоги), которые получаются при абразивной обработке.

Определим, какую частоту вращения должен сообщать главный привод при чистовой токарной обработке наружных поверхностей заготовки ходового винта, зная, что частота вращения n связана со скоростью резания v следующей зависимостью

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot d_{\text{заг}}}$$

Для диаметра ходового винта 20 мм при чистовой обработке наружной поверхности минералокерамическими резцами рекомендуется [4] скорость резания $v = 488$ м/мин.

Подставив в формулу скорость резания $v = 488$ м/мин, а вместо $d_{заг}$ (диаметра заготовки) диаметр ходового винта, равный 20 мм, получим:

$$n = \frac{1000 \cdot 488}{\pi \cdot 20} = 7770 \text{ мин}^{-1}$$

Рассчитаем значение частоты вращения главного привода для следующего диапазона диаметров ходового винта от 24 до 44 мм:

При $d_{заг}=24$ мм:

$$n = \frac{1000 \cdot 488}{\pi \cdot 24} = 6472 \text{ мин}^{-1}$$

При $d_{заг}=28$ мм:

$$n = \frac{1000 \cdot 488}{\pi \cdot 28} = 5548 \text{ мин}^{-1}$$

При $d_{заг}=32$ мм:

$$n = \frac{1000 \cdot 488}{\pi \cdot 32} = 4854 \text{ мин}^{-1}$$

При $d_{заг}=36$ мм:

$$n = \frac{1000 \cdot 488}{\pi \cdot 36} = 4315 \text{ мин}^{-1}$$

При $d_{заг}=40$ мм:

$$n = \frac{1000 \cdot 488}{\pi \cdot 40} = 3883 \text{ мин}^{-1}$$

При $d_{заг}=44$ мм:

$$n = \frac{1000 \cdot 488}{\pi \cdot 44} = 3530 \text{ мин}^{-1}$$

При обтачивании наружной поверхности на отечественных универсальных токарно-винторезных станках (см. технические характеристики моделей 16К20, 1600, 16Т03А и др.) а также и на токарных станках с ЧПУ (модели 16С05АФ1, 16Б16Ф3 и др.) главный привод не обеспечивает такой частоты вращения шпинделя.

Аналогичными расчетами установлено, что чистовую токарную обработку наружных поверхностей с использованием прогрессивных инструментальных материалов можно выполнять только для диаметров ходовых винтов 60...120 мм, которые, следует отметить, применяются крайне редко.

Второй момент, который необходимо выяснить, сколько потребуется мощности при черновой обработке наружной поверхности, если использовать рассмотренные выше прогрессивные инструментальные материалы.

Рассмотрим, какая мощность главного привода потребуется при черновой обработке наружных поверхностей ходовых винтов при использовании прогрессивных режущих инструментов [8].

Сила резания P_z определяется по формуле [9,10]:

$$P_z = C_p \cdot t^{X_p} \cdot S_o^{Y_p} \cdot K_M.$$

Рассчитаем силу резания P_z при черновой обработке [1, 3] наружной поверхности с глубиной резания $t=2$ мм, продольной подачей $S_o=0,16$ мм/об и коэффициентами $X_p=1$, $Y_p=1$ и $K_M=1,3$, зависящими от обрабатываемого материала заготовки и этапа обработки.

Подставив в эту зависимость $C_p=1950$, $t^{X_p}=2^1$, $S_o^{Y_p}=0,16^{0,81}$ и $K_M=1,3$, получим $P_z=1149$ Н.

Зная P_z , можно определить эффективную мощность резания [6]:

$$N_{\text{эф}} = \frac{1149 \cdot 434}{60000} = 8,3 \text{ кВт.}$$

Отсюда следует, что электродвигатель должен иметь мощность (без учета коэффициента безопасности):

$$N_{\text{эд}} = \frac{N_{\text{эф}}}{\eta} = \frac{8,3}{0,8} = 10,4 \text{ кВт.}$$

Из имеющихся в станочном парке токарно-винторезных станков, удовлетворяют такому требованию только несколько моделей, это: 1М63Ц, 16К30П, 165, РТ-25С3, РТ-436 и РТ-539, причем они имеют невысокую частоту вращения шпинделя (первые три модели 1250 мин^{-1} , а последние три – 500 мин^{-1}), что совершенно недопустимо при использовании высокопроизводительных инструментальных материалов.

Проведенные расчеты показывают, что на существующих моделях универсальных токарно-винторезных станков нельзя эффективно использовать новые прогрессивные инструментальные материалы.

Другой проблемой является нарезание резьбы на длинных ходовых винтах (длиной 5000 мм). Существуют два исполнения модели специализированного токарно-винторезного станка 1622, кинематика которых обеспечивает максимальную частоту вращения шпинделя 80 мин^{-1} и мощность главного привода 4 кВт. На этих станках осуществляется только чистовое нарезание резьбы на ходовом винте. В то же время среди универсальных токарно-винторезных станков имеется только две модели (РТ-25С3 и РТ-25), на которых можно выполнить обтачивание наружной поверхности ходовых винтов такой длины, притом, совершенно не используя новые высокоскоростные инструментальные материалы, так как максимальная частота вращения шпинделя на этих станках 1250 мин^{-1} .

Вывод.

Для эффективного применения существующих современных прогрессивных инструментальных материалов и повышения производительности обработки наружных поверхностей ходовых винтов необходимо серьезно модернизировать главный привод универсальных токарно-винторезных станков, повысив мощность главного привода и увеличив частоту вращения шпинделя. Для этого необходимо устранить шестеренные коробки скоростей и использовать в главном приводе современные электродвигатели

большей мощности с бесступенчатым регулированием и высокой частотой вращения его вала, например, Siemens 1LE.

Литература

1. *Бабушкин А.З.* Технология изготовления металлообрабатывающих станков и автоматических линий: Учеб. пособие для учащихся машиностроительных техникумов / А. З. Бабушкин, В. Ю. Новиков, А. Г. Схиртладзе. – М. : Машиностроение, 1982. – 272 с.
2. *Багдасарова Т. А.* Токарь-универсал: учеб. пособие для нач. проф. образования / Т. А. Багдасарова. — М.: Изд. центр «Академия», 2004. — 288 с.
3. *Барановский Ю.В.* Режимы резания металлов: Справочник. — Л.А. Брахман, А.И. Гдалевич и др. — М.: НИИТавтопром, 1995. — 495 с.
4. *Вереина Л. И.* Справочник станочника: учебное пособие для нач. проф. образования / Л.И. Вереина, М.М. Краснов. — 2-е изд., — М. : Изд. центр «Академия», 2008. — 560 с.
5. *Верещака А.С.* Анализ проблемы использования экологически безопасного сухого резания. / Материалы XII Международного научно-технического семинара «Высокие технологии: Тенденции развития». — Ю.В. Полоскин, А.К. Кириллов и др. — Харьков, ХПИ, 2002.
6. Краткий справочник металлиста / под общ. ред. А. Е. Древаля, Е.А. Скороходова. 4-е изд. перераб. и доп. М. : Машиностроение, 2005. — 959 с.
7. *Мухин А.В.* Производство деталей металлорежущих станков: Учеб. пособие для машиностроительных специальностей вузов / А.В. Мухин, О.В. Спиридонов, А.Г. Схиртладзе и др. – М. : Машиностроение, 2001. – 560 с. ил.
8. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов: Справочник / В.И. Баранчиков, А.В. Жаринов, Н.Д. Юдина и др.; Под ред. В.И. Баранчикова. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.
9. Справочник технолога-машиностроителя / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 2001. –Т.1 / 2001.– 910с
10. Справочник технолога-машиностроителя / Под ред. А.М. Дальского, А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 2001. Т.2 / 2001. – 944с.
11. Справочник токаря-универсала / Д. Г. Белецкий, В. Г. Моисеев, М.Г. Шеметов; Под ред. М.Г. Шеметова.— М.: Машиностроение, 1987.— 560 с.

УДК 621.9-18

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ СИЛОВЫХ СМЕЩЕНИЙ УПРУГО-ФРИКЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Андрей Геннадьевич Ширшов

Аспирант 1 года,

кафедра «Металлорежущие станки»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: П.М. Чернянский,

доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Задача автоматизации исследований силовых смещений является частью задачи разработки программы для автоматизации расчёта и анализа силовых смещений станков на стадии их проектирования. Данная работа ведётся на базе теории силовых смещений Чернянского П.М. [1]. Согласно этой теории, конструкция сводится к упруго-фрикционной системе (УФС), которая отражает физические свойства изучаемой конструкции. Особенность использования в расчётах смещений УФС состоит в том, что все процессы, все факторы, влияющие на величину силовых смещений вершины инструмента и, следовательно, на силовую составляющую точности станка, представлены в виде системы. В итоге можно сказать, где слабое звено, на что следует конструктору обратить внимание при проектировании станка, когда величина силовых смещений превышает заданные пределы.

Основной работой в процессе автоматизации расчётов является разработка такой математической модели расчёта силовых смещений, чтобы с одной стороны был сохранён системный подход к конструкции, факторам и процессам, и, с другой стороны, полученные алгоритмы решения легко поддавались автоматизации расчёта на компьютере.

Ранее была проведена автоматизация расчёта характеристики силовых смещений (ХСС) для одного модуля упруго-фрикционной системы (УФС). В результате была создана программа Динара для расчёта силовых смещений в УФС. Фактически это была не полноценная программа, а набор авторских модулей, разработанных средствами программы MBTU 3.7 («Моделирование В Технических Устройствах», создана на кафедре Э7 «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана, представляет собой бесплатный аналог Simulink). Расчёт смещений проводился программой MBTU 3.7., при этом пользователь задавал структуру УФС, расставляя в окне программы блоки - модули УФС.

Позднее анализ работы программы Динара показал, что, хотя смещения одного модуля УФС программа считала правильно, смещения всей системы считались неверно. Кроме того, оказалось, что программы типа MBTU и Simulink не подходят для расчёта смещений в УФС: необходим совершенно другой подход.

Поиск нового метода для расчёта смещений системы модулей привёл к методу конечных элементов (МКЭ). Согласно работе [2], модули УФС являются уже готовыми конечными элементами (КЭ). И МКЭ здесь оказывается методом математически точным, потому что отсутствует алгоритм разбиения среды на конечные элементы, который и вносит погрешность в расчёты (этот алгоритм носит название «Триангуляция

Делоне»). Кроме того оказалось, что МКЭ позволяет решать задачи не только численно, но и аналитически, что окончательно определило выбор этого метода.

Рассмотрим фрагмент одномерной пружинной системы (рис. 1). Перемещения всех узлов допускаются только вдоль оси Oy . Выделим одну пружину, имеющую узлы 1 и 2 (см. рис. 2). Для этого отбросим все остальные пружины, а их действие заменим неизвестными реакциями в узлах 1 и 2. Положительные направления перемещений y_1 , y_2 узлов и реакций F_1 и F_2 примем совпадающими с направлением оси Oy .

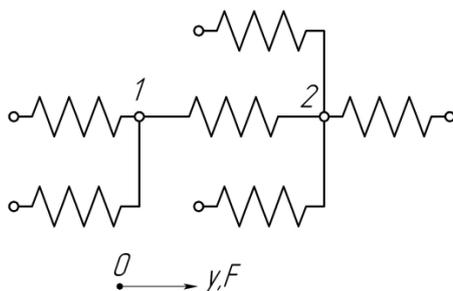


Рис. 1. Фрагмент одномерной пружинной системы

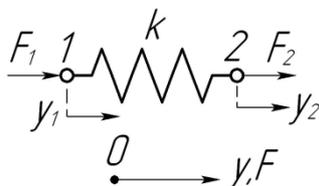


Рис. 2. Конечный элемент (пружина)

Из уравнения равновесия следует:

$$F_1 + F_2 = 0 \quad 1$$

Согласно закону Гука (работа [3]), между силой упругости $F_{\text{упр}}$ и абсолютным удлинением пружины Δ имеет место следующая зависимость:

$$F_{\text{упр}} = k \cdot \Delta \quad 2$$

где $F_{\text{упр}}$ — сила упругости пружины, Н,
 k - жёсткость элемента, Н/мкм,
 Δ — абсолютное удлинение пружины, мкм.
 Абсолютное удлинение пружины равно:

$$\Delta = y_1 - y_2 \quad 3$$

где y_1 и y_2 — смещения узлов 1 и 2 пружины соответственно, мкм.

Приравнявая $F_1 = F_{\text{упр}}$, получаем:

$$F_1 = k \cdot (y_2 - y_1) \quad 4$$

С учётом уравнения 1 для F_2 получаем:

$$F_2 = -F_1 = k \cdot (y_1 - y_2), \quad 5$$

В матричном виде уравнения 4 и 5 записываются следующим образом:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} \quad 6$$

Матрицу

$$K = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad 7$$

называют матрицей жёсткости элемента (пружины) или сокращённо МЖЭ.
 Вектор-столбец

$$F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad 8$$

называют вектором-столбцом узловых сил, а вектор-столбец

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} \quad 9$$

называют вектором-столбцом узловых перемещений. В сокращённом виде уравнение 6 запишется следующим образом:

$$F = K \cdot Y \quad 10$$

Важно подчеркнуть, что уравнение 6 или 10 позволяет, не зная конкретных значений векторов Y и F , установить связь между узловыми перемещениями Y и узловыми реакциями F , т.е. характеризует свойства конечного элемента. Это позволяет, определив значения узловых реакций F , находить узловые смещения Y .

Рассмотрим пружинную систему, показанную на рис. 3. Система имеет три степени свободы: перемещения y_1 , y_2 , y_3 . Составим алгебраические уравнения, позволяющие определить эти перемещения. Будем использовать способ, основанный на записи уравнения равновесия узлов пружин. Возьмём первую пружину жёсткости k_1 . К ней подходят две пружины жёсткостью k_2 и k_4 . Отбросим эти пружины, заменив их действительными реакциями. Аналогично необходимо будет сделать для остальных узлов системы пружин. Запишем выражения для реакций в узлах. При этом будем придерживаться следующего правила: верхний индекс будет означать принадлежность конкретной пружине, а нижний индекс будет означать принадлежность узлу пружины (первому или второму). Полученные уравнения будут иметь следующий вид:

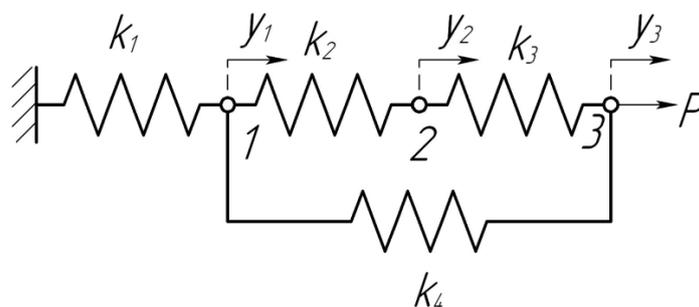


Рис. 3. Пружинная система

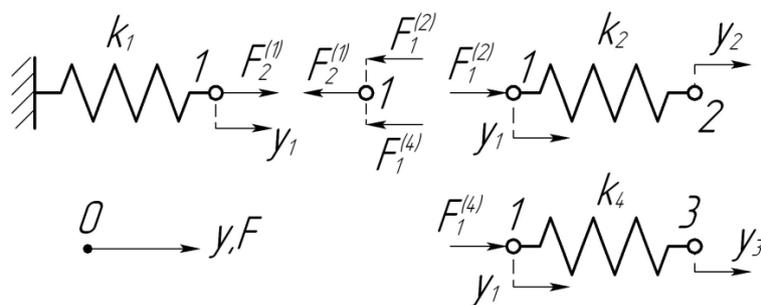


Рис. 4. Реакции в системе (первый узел)

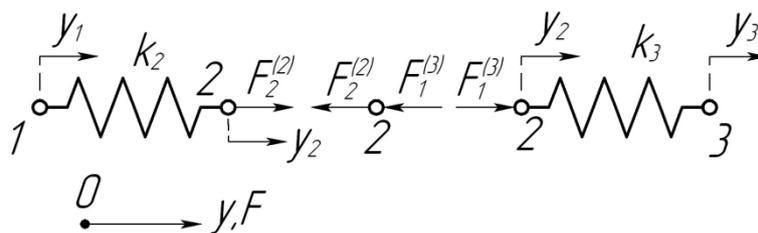


Рис. 5. Реакции в системе (второй узел)

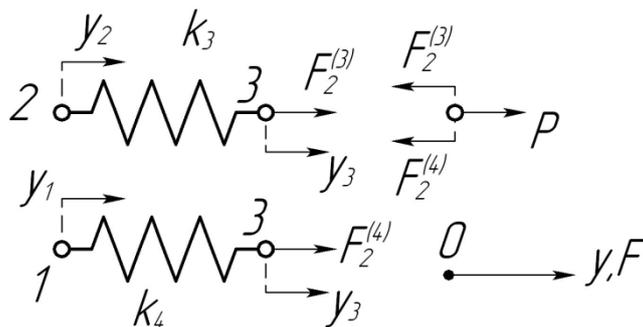


Рис. 6. Реакции в системе (третий узел)

$$\left. \begin{aligned}
 &\text{Для пружины № 1} \\
 &y_1^{(1)}=0; \quad y_2^{(1)}=y_1; \quad k^{(1)}=k_1; \quad F_2^{(1)}=k_1 \cdot y_1 \\
 &\text{Для пружины № 2} \\
 &y_1^{(2)}=0; \quad y_2^{(2)}=y_2; \quad k^{(2)}=k_2; \quad F_1^{(2)}=k_2 \cdot (y_1 - y_2) \\
 &\text{Для пружины № 3} \\
 &y_1^{(3)}=0; \quad y_2^{(3)}=y_3; \quad k^{(3)}=k_3; \quad F_1^{(3)}=k_3 \cdot (y_2 - y_3) \\
 &\text{Для пружины № 4} \\
 &y_1^{(4)}=0; \quad y_2^{(4)}=y_3; \quad k^{(4)}=k_4; \quad F_1^{(4)}=k_4 \cdot (y_1 - y_3)
 \end{aligned} \right\}$$

11

Воспользовавшись уравнением реакций 11, запишем уравнение равновесия первого узла (см. рис. 4) через перемещения:

$$(k_1 + k_2 + k_4)y_1 - k_2y_2 - k_4y_3 = 0 \quad 12$$

Аналогичным образом составляются уравнения равновесия для второго и третьего узла (также см. рис. 5 и 6). С учётом того, что:

$$\begin{aligned} F_2^{(2)} &= k_2 \cdot (-y_1 + y_2); \\ F_2^{(3)} &= k_3 \cdot (y_2 + y_3); \\ F_2^{(3)} &= k_3 \cdot (-y_2 + y_3); \\ F_2^{(4)} &= k_4 \cdot (-y_1 + y_3), \end{aligned} \quad 13$$

получим уравнения равновесия для остальных узлов. В итоге будет следующая система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} (k_1 + k_2 + k_4)y_1 - k_2y_2 - k_4y_3 &= 0 \\ -k_2y_1 + (k_2 + k_3)y_2 - k_3y_3 &= 0 \\ -k_4y_1 - k_3y_2 + (k_3 + k_4)y_3 &= P \end{aligned} \right\} \quad 14$$

В матричном виде систему уравнений 14 удобнее всего представить следующим образом:

$$\begin{bmatrix} (k_1 + k_2 + k_4) & -k_2 & -k_4 \\ -k_2 & (k_2 + k_3) & -k_3 \\ -k_4 & -k_3 & (k_3 + k_4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ P \end{bmatrix} \quad 15$$

Или сокращённо:

$$K \cdot Y = F \quad 16$$

где K — матрица жёсткости конструкции (МЖК),
 Y — вектор узловых смещений,
 F — вектор узловых сил.

Система алгебраических уравнений 15 называют разрешающей системой уравнений МКЭ. Решением системы 15 определяются неизвестные смещения y_1, y_2, y_3 .

Рассмотренная выше методика построения уравнения МКЭ для системы пружин довольно громоздка. На практике специалист по МКЭ формирует систему уравнений сразу, используя в качестве исходной информации только схему пружинной системы. При этом вся работа по формированию матричного уравнения состоит из пяти последовательных шагов, описанных ниже.

Перед тем, как описывать эти шаги, необходимо отметить, что элементы матрицы и вектора будут называться ячейками этой матрицы (этого вектора), как это принято при программировании. В дальнейшем это позволит избежать путаницы между элементами матрицы и элементами системы пружин и УФС — упруго-фрикционной системы.

Шаг 1. Нумерация узлов конечных элементов.

Все узлы системы пружин нумеруются по порядку цифрами 1, 2, 3 и т.д. Те узлы, которые не имеют возможности перемещаться, получают номер ноль.

Шаг 2. Генерация МЖЭ для всех элементов системы.

Для каждого элемента (пружины) формируется МЖЭ по следующей зависимости:

$$\text{МЖЭ: } k_i \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_i & -k_i \\ -k_i & k_i \end{bmatrix}, \quad 17$$

где k_i — жёсткость КЭ (задаётся пользователем или определяется автоматически).

К полученным МЖЭ добавляются сверху и слева соответственно строка и столбец с номерами узлов. Номера узлов записываются в порядке их последовательного увеличения слева направо в строке и сверху вниз в столбце. Пусть для примера левый узел первого элемента жёсткости k_1 имеет номер 0, а правый узел этого элемента имеет номер 1. Тогда матрица жёсткости этого элемента будет выглядеть следующим образом (см. рис. 7).

	0	1
0	k_1	$-k_1$
1	$-k_1$	k_1

Рис. 7. Матрица жёсткости элемента 1 (рис. 3)

Добавочные столбцы и строки определяют новые индексы ячеек МЖЭ и используются в дальнейшем для передачи значений из ячеек МЖЭ в МЖК.

Шаг 3. Генерация пустой МЖК.

Формируется нулевая матрица размером $N \times N$, где N — количество узлов системы, имеющих возможность перемещения (их номер отличен от нуля). К этой матрице также добавляются строка и столбец с номерами узлов. Узлы перечисляются по порядку от 1 до N . Для системы, имеющей три подвижных узла, данная матрица будет иметь следующий вид (см. рис. 8). Добавочные столбцы и строки определяют новые индексы ячеек МЖК и используются в дальнейшем для приёма значений из ячеек МЖЭ.

	1	2	3
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0

Рис. 8. Матрица жёсткости конструкции

Шаг 4. Заполнение МЖК.

При заполнении МЖК программа последовательно перебирает ячейки МЖЭ всех элементов системы пружин. Значения в этих ячейках пересылается в ячейки МЖК. При этом:

- 1) значение в ячейке МЖК суммируется со значением из ячейки МЖЭ,
- 2) адрес ячейки МЖК совпадает с адресом ячейки МЖЭ.

Если в адресе ячейки МЖЭ хотя бы одно из чисел является нулём, то значение этой ячейки не попадает в МЖК, потому что в МЖК нет ячеек с нулевым адресом.

Шаг 5. Формирование остальных векторов матричного уравнения системы.

Для получения матричного уравнения системы нам остаётся сформировать ещё два вектора: узловых смещений и сил, приложенных к узлам системы. Первый вектор содержит смещения в узлах системы. Второй вектор содержит значения внешних сил, приложенных к узлам системы. Номера ячеек этих векторов соответствуют номерам узлов системы. Вектор узловых смещений будет иметь вид $[u_1, u_2, u_3]^T$, вектор узловых сил будет иметь вид $[0, 0, 0, P]^T$. Сравнивая матричные уравнения, полученные программным путём и вручную, отметим, что они полностью совпадают.

Рассмотрим схему, представленную на рис. 9. К телу жёсткости k , которое лежит на краю некоторого недеформируемого основания, прикладывается внешняя сила F . При смещении края тела появляется сила трения $F_{тр}$. Силовые смещения края рассматриваемого тела в работе [1] моделируется с помощью модуля УФС с независимыми элементами упругости и трения. Посмотрим, как можно смоделировать эти смещения, используя МКЭ.

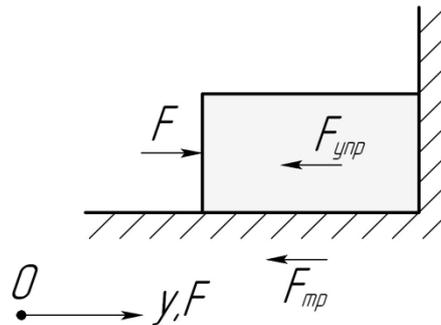


Рис. 9. Схема для расчёта силовых смещений

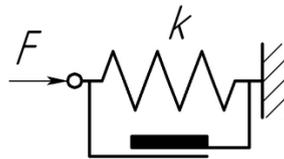


Рис. 10 - Схема для расчёта силовых смещений с использованием модулей УФС.

При использовании МКЭ упругие свойства тела моделируются использованием пружины жёсткости k . Правый конец этой пружины соединяется с заделкой, т.к. правый край тела смещений не имеет, а к левому краю пружины прикладываются силы, которые определяют смещение пружины — силы F и $F_{тр}$ (см. рис. 11). При этом величина силы трения $F_{тр}$ определяется в зависимости от внешней силы и смещения пружины по следующей зависимости:

$$F_{тр} = \begin{cases} T, & yk - T \\ -T, & yk + T \\ F - yk, & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad 18$$

где T — максимальная величина силы трения, Н,
 y — текущее значения смещения тела, мкм.

В начальный момент времени величина y всегда равна нулю (начальное условие при моделировании).

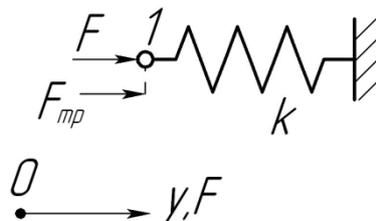


Рис. 11. Схема для расчёта силовых смещений с использованием МКЭ

Таким образом, у нас получилась простейшая система, состоящая из одного элемента, смещения в которой несложно программно рассчитать по алгоритму, описанному в главе . В этой системе всего один узел с номером 1. Сформируем МЖЭ. Она имеет всего одну ячейку со значением k :

$$\text{МЖЭ: } [k] \quad 19$$

Вектор узловых смещений состоит из одной ячейки со смещением y , а вектор узловых сил состоит из одной ячейки с силой $F - F_{\text{тр}}$. В итоге получаем следующее матричное уравнение:

$$[k][y] = [F - F_{\text{тр}}] \quad 20$$

Уравнение 20 легко приводится к скалярному уравнению, описывающему смещения модуля УФС с независимыми элементами упругости и трения в работе [1]:

$$y = \frac{F - F_{\text{тр}}}{k} \quad 21$$

Т.к. уравнения, описывающие силовые смещения, совпадают, использование МКЭ в том виде, как это описано в этом разделе выше, даст ту же ХСС (характеристику силовых смещений), что и использование модуля УФС с независимыми элементами упругости и трения.

Таким образом, данный модуль УФС можно заменить схемой на рисунке и рассчитывать смещения программно.

Рассмотрим УФС, состоящей из двух последовательно соединённых модулей с независимыми элементами упругости и трения (см. рис. 12).

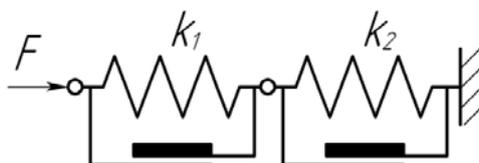


Рис. 12. Схема двух последовательно соединённых модулей УФС

Для расчёта силовых смещений последовательного соединения элементов в работе [1] имеем следующую зависимость:

$$y = \frac{F - F_{\text{тр}1}}{k_1} + \frac{F - F_{\text{тр}1} - F_{\text{тр}2}}{k_2} \quad 22$$

Посмотрим, как можно получить ту же зависимость, используя МКЭ. Для этого заменяем модули с независимыми ЭУ и ЭТ (элементом упругости и элементом трения) на их эквиваленты для МКЭ. В итоге получим систему, показанную на рис. 13.

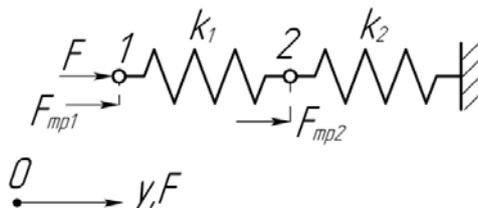


Рис. 13. Аналог схемы на рисунке 12 для расчёта с использованием МКЭ

В системе на рис. 13 имеется 2 узла, которых обозначим 1 и 2. Сформируем МЖЭ. Для левой пружины получим МЖЭ, представленную на рис. 14, для правой пружины — на рис. 15.

	1	2
1	k_1	$-k_1$
2	$-k_1$	k_1

Рис. 14. МЖЭ для левой пружины

	2	0
2	k_2	$-k_2$
0	$-k_2$	k_2

Рис. 15. МЖЭ для правой пружины

МЖК для данной системы представлена на рис. 16.

	1	2
1	k_1	$-k_1$
2	$-k_1$	k_1+k_2

Рис. 16. Матрица жёсткости конструкции

Вектор узловых смещений имеет вид $[y_1; y_2]^T$, вектор узловых сил имеет вид $[F-F_{тр1}; -F_{тр2}]^T$ (каждая ячейка имеет только те силы, которые приложены к узлу соответствующего номера). В итоге получим следующее матричное уравнение:

$$\begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1+k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F+F_{тр1} \\ F_{тр2} \end{bmatrix} \quad 23$$

Переходя от матричного уравнения к СЛАУ (системе линейных алгебраических уравнений), получаем:

$$\left. \begin{aligned} k_1 y_1 - k_1 y_2 &= F + F_{тр1} \\ -k_1 y_1 + (k_1 + k_2) y_2 &= F_{тр2} \end{aligned} \right\} \quad 24$$

Решая СЛАУ (уравнение 24), получим:

$$y_2 = \frac{F + F_{тр1} + F_{тр2}}{k_2} \quad 25$$

$$y_1 = \frac{F + F_{тр1}}{k_1} + y_2 = \frac{F + F_{тр1}}{k_1} + \frac{F + F_{тр1} + F_{тр2}}{k_2}$$

С учётом того, что силы трения при положительном значении внешней силы F будут меньше нуля, уравнение смещения y_1 узла 1 полностью совпадает с уравнением 22! Следовательно, использование МКЭ будет давать корректные результаты.

Опишем последовательность расчёта системы из двух модулей УФС (рисунок 12) с использованием МКЭ:

- 1) Модули УФС заменяются их эквивалентами для МКЭ.
- 2) Определяется величина $F_{тр1}$.

- 3) Определяется величина $F_{тр2}$.
- 4) Формируется вектор узловых сил.
- 5) Формируются МЖЭ.
- 6) Формируется МЖК.
- 7) Формируется вектор узловых смещений.
- 8) Решается матричное уравнение.

В УФС существуют модули, содержащие в различных комбинациях следующие ЭУ и ЭТ:

- 1) зависимый ЭУ,
- 2) независимый ЭУ,
- 3) зависимый ЭТ,
- 4) независимый ЭТ,
- 5) «комбинированный» ЭТ.

Независимый ЭУ означает жёсткость, величина которой постоянна и не зависит от величины внешней силы. Если ЭУ зависимый, то имеет место зависимость величины жёсткости элемента от внешней силы. В этом случае при формировании МЖЭ необходимо предварительно вычислить значение жёсткости элемента. При независимом ЭТ максимальная величина T силы трения не зависит от величины внешней силы и используется при расчёте текущего значения непосредственно. При зависимом ЭТ величина T зависит от значения внешней силы F и предварительно рассчитывается каждый раз перед использованием в расчётах. «Комбинированный» ЭТ представляет собой сумму зависимого и независимого ЭТ. Другими словами, величина силы трения имеет постоянную и переменную составляющие. В этом случае величина силы трения также рассчитывается перед использованием в дальнейших расчётах.

При расчёте силовых смещений цепочки последовательно соединённых произвольных модулей УФС следует пользоваться следующей методикой:

- 1) Модули УФС заменяются их эквивалентами для МКЭ.
- 2) Определяются значения жёсткостей для зависимых ЭУ.
- 3) Определяются значения максимальных значений сил трения для зависимых ЭТ.
- 4) Определяются величина сил трения $F_{три}$.
- 5) Формируется вектор узловых сил.
- 6) Формируются МЖЭ.
- 7) Формируется МЖК.
- 8) Формируется вектор узловых смещений.
- 9) Решается матричное уравнение.

Рассмотрим схему на рис. 17. От схемы на рис. 9 её отличает наличие зазора. В работе [1] для расчёта силовых смещений в этой схеме используется модуль с независимыми ЭУ и ЭТ и с зазором. Попробуем получить то же самое, используя МКЭ.

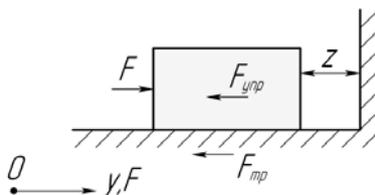


Рис. 17. Схема для расчёта силовых смещений. В системе появляется зазор

Первая трудность моделирования зазора связана с тем, что зазор представляет собой пустоту, и физического объекта для моделирования фактически нет. Выходом из

данной ситуации является использование физического объекта-заместителя, который обладает свойствами исходного объекта или явления (в данном случае зазора).

Наиболее подходящим объектом-заместителем в данном случае является использование пружины переменной жёсткости. Однако необходимо учитывать, что после разгрузки системы смещение тела равно сумме остаточного смещения и величины ненулевого зазора. Использование только пружины переменной жёсткости при нулевом нагружении даст нулевую величину зазора независимо от величины жёсткости. Использование помимо пружины-заместителя зазора дополнительной силы позволяет правильно моделировать поведение зазора при последовательном соединении элементов и ведёт к неверным результатам расчётов при параллельной схеме связи.

Удачным решением для моделирования поведения пружины-заместителя зазора при разгрузке системы оказалось введение в общую структуру уравнения для МКЭ столбца коррекции U :

$$K \cdot (Y + U) = F \quad 26$$

От уравнения 16 данное уравнение отличается тем, что присутствует столбец коррекции U — этот столбец содержит корректирующие величины смещений, которые добавляются к величине смещения пружины. Это позволяет, используя пружины, моделировать объекты, имеющие остаточные смещения при разгрузке. Этот подход позволяет моделировать не только зазор, но и смещения в стыке при нормальном нагружении, которые никогда не снимаются после снятия нагрузки.

Жёсткость пружины-заместителя зазора k_z определяется по следующей зависимости:

$$k_z = \begin{cases} 0, & F \leq 0 \\ F/z, & F > 0 \end{cases} \quad 27$$

где F — сила, действующая на пружину-заместитель зазора, Н,
 k_z — жёсткость пружины-заместителя зазора, Н/мм,
 z — величина одностороннего зазора, мм.

Величина смещения пружины определяется по следующей зависимости:

$$y = F/z + u \quad 28$$

где u — корректирующее смещение, мм:

$$u = \begin{cases} 0, & F \neq 0 \\ y_{-1}, & F = 0 \end{cases} \quad 29$$

где y_{-1} — текущая величина смещения (берётся с предыдущего шага расчёта). В итоге величина смещения пружины-заместителя имеет вид:

$$y = \begin{cases} 0, & F < 0 \\ z, & F > 0 \\ u, & F = 0 \end{cases} \quad 30$$

Для моделирования зазора с использованием МКЭ было придумано специальное обозначение, представленное на рис. 18.



Рис. 18. Обозначение элемента с нелинейными смещениями и остаточными смещениями после разгрузки

Следует отметить, что уравнения 28 - 30 составлены исходя из предположения, что, как только тело начинает проскальзывать, оно начинает двигаться свободно и смещается на величину зазора. Указанные уравнения не работают в случае, когда конец тела закреплён жёстко и при наличии проскальзывания в стыке идёт только процесс деформирования тела.

Для проверки правильности моделирования зазора найдём силовые смещения для всей системы, представленной на рис. 17 и сравним полученный результат с тем, что даёт модуль с независимыми ЭТ и ЭУ и зазором.

Заменяем модуль УФС схемой на рис. 11, а зазор — схемой на рис. 18. В итоге получим схему, показанную на рис. 19. Пронумеруем узлы по порядку слева направо. МЖЭ для пружин имеет вид, представленный на рис. 19 - 21.

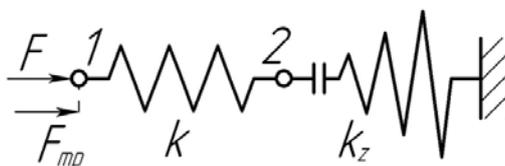


Рис. 19. Схема для расчёта смещений в системе на рис. 17 с использованием МКЭ

	1	2
1	k_1	$-k_1$
2	$-k_1$	k_1

Рис. 20. МЖЭ для левой пружины

	2	0
2	k_z	$-k_z$
0	$-k_z$	k_z

Рис. 21 МЖЭ для правой пружины

МЖК для рассматриваемой системы имеет вид, представленный на рис. 22.

	1	2
1	k_1	$-k_1$
2	$-k_1$	k_1+k_z

Рис. 22 Матрица жёсткости элемента 1 (рис. 3)

Вектор узловых смещений имеет вид $[y_1; y_2]^T$, где y_1 — смещение левого края тела на рис. 17, а y_2 — смещение правого тела (тот же рис.). Вектор узловых реакций имеет вид $[F-F_{\text{тр}}; R_z]^T$. В итоге имеем следующее матричное уравнение:

$$\begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1+k_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F+F_{\text{тр}1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad 31$$

Данное уравнение отличается от уравнения 22 тем, что вместо $F_{\text{тр}2}$ стоит 0. Решение такого уравнения будет выглядеть следующим образом:

$$y_2 = \frac{F+F_{\text{тр}1}}{k_z} \quad 32$$

$$y_1 = \frac{F+F_{\text{тр}1}+R_z}{k_1} + y_2 = \frac{F+F_{\text{тр}1}}{k_1} + \frac{F+F_{\text{тр}1}}{k_z} + u_1$$

где u_1 — корректирующее смещение узла 1.

Проанализируем, как изменяются смещения, описываемые уравнением 32 (см. табл. 1):

Табл. 1. Анализ изменения силовых смещений, рассчитываемых по формуле 32.

	F	$F_{\text{тр}}$	$F+F_{\text{тр}}$	k_z	y_2	y_1
↑	[0; T]	-F	0	$1/0 = \infty$	0 ($u=0$)	0
↑	[T; 3T]	-T	$F-T > 0$	$(F-T)/z$	z	$(F-T)/k+z$
↓	[3T; T]	$F-yk$	$yk > 0$	yk/z	z	$y+z$
↓	(T; 0)	T	$F+T > 0$	$(F+T)/z$	z	$(F+T)/k+z$
↓	0	T	$T > 0$	T/z	z	$T/k+z$
↓	(0; -T]	T	$T-F > 0$	$(T-F)/z$	z	$(T-F)/k+z$
↓	-T	T	0	$0/0 = 0$	z ($u=z$)	z
↓	<-T	T	$T-F < 0$	0	$-\infty$	$-\infty$

Последняя строка табл. 1 означает, что началось проскальзывание, и ничто уже не мешает свободному движению тела. При этом система не сопротивляется внешнему воздействию. Анализ смещений табл. показывает, что система-аналог для расчёта МКЭ даёт такие же силовые смещения, что и модуль УФС с независимыми ЭУ и ЭТ и зазором. Следовательно, моделирование зазора для использования МКЭ проведено правильно.

В работе [1] есть модуль УФС, который отвечает за наличие пластических деформаций в системе. Данные деформации наблюдаются при нагружении стыка нормальной силой. Особенностью смещений является то, что они:

- 1) нелинейны,
- 2) никогда не возвращаются в ноль,
- 3) при каждой последующей разгрузке остаточные смещения увеличиваются.

Зависимость величины смещения в стыке при нескольких последовательных его нагружениях представлена на рис. 23.

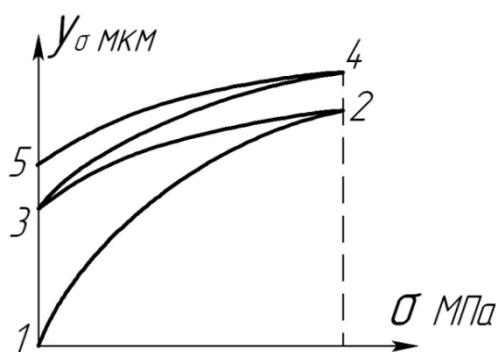


Рис. 23. Изменение смещений y_σ в нормально-деформируемом стыке в зависимости от напряжения σ . Цифры 1-5 — последовательность нагружения

Данные смещения моделируются точно так же как и односторонний зазор. При этом используется тот же самый элемент (см. рис. 18). Остаётся только собрать сведения, которые бы позволили задавать значения корректирующих смещений для пружины, имитирующей пластические деформации, для чего потребуются провести дополнительные исследования.

Благодаря наработкам, представленным в данном разделе, можно решать с использованием МКЭ цепочки произвольной длины последовательно соединённых модулей УФС и очень ограниченное количество систем с параллельными связями модулей. При этом имеется возможность использовать практически все модули УФС. Для того, чтобы рассчитывать произвольные одномерные УФС, остаётся научиться определять силовые смещения УФС при наличии последовательного соединения элементов и соединения элементов, которое не является ни последовательным ни параллельным. После решения вышеперечисленных задач можно будет перейти к двумерным и трёхмерным УФС.

Понятие типовых элементов конструкции введено в работе [1]. Согласно этой работе, в любой конструкции можно выделить деформируемые детали и деформируемые стыки. В свою очередь деформируемые стыки делятся на тангенциально деформируемые и нормально деформируемые стыки. Отдельно необходимо выделить элемент зазора, назначенного конструктором.

Выделение типовых элементов конструкции представляет собой промежуточный этап перехода от конструкции к УФС. Каждому типовому элементу конструкции соответствует своя типовая система модулей УФС. Таким образом можно от типовых элементов конструкции переходить непосредственно к УФС.

Деформируемая деталь несёт в себе только упругие свойства конструкции, причём жёсткость детали — величина постоянная. Деформируемые детали моделируются одной или системой нескольких пружин постоянной жёсткости. Задача нахождения смещения системы пружин описана в разделе 2.3.2.

Тангенциальный стык имеет место при нагружении реального стыка силой, лежащей в плоскости, параллельной плоскости стыка. При этом в стыке возникает сила трения. Выше была решена задача о моделировании трения с использованием МКЭ (раздел 2.3.1), однако там упругие смещения тела не отделялись от смещений в стыке. Задача раздельного моделирования трения в стыке решена и описана в данном разделе.

Нормально деформируемый стык имеет место при нагружении реального стыка нормальной силой. При этом смещения в стыке не только нелинейны, но и

сопровождаются пластическими деформациями. При моделировании такого стыка используется модуль УФС, отвечающий за наличие пластических деформаций в УФС. Моделирование нормально нагруженного стыка описано ниже.

Рассмотрим схему, представленную на рис. 24. Основание и тело считаем недеформируемыми. Слева от тела есть зазор z_1 , справа от тела — зазор z_2 . При нагружении тела силой F появляется сила трения $F_{тр}$. Пока $F < T$ — максимальной величины силы трения, $F_{тр} = -F$, и тело стоит неподвижно. Как только $F \geq T$, тело начинает скольжение и смещается на величину зазора до края недеформируемого основания. При уменьшении внешней силы $F < T$ и $F_{тр} = -F$. После того, как F , достигнув нуля, меняет своё направление и идёт процесс обратного нагружения сначала сила трения $F_{тр} = -F$ (при $|F| < T$), потом $|F_{тр}| = T$, и проскальзывание происходит на величину суммы двух начальных зазоров z_1 и z_2 .

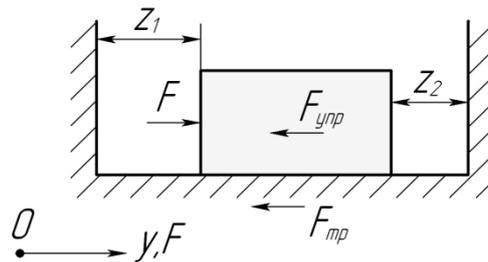


Рис. 24. Схема для моделирования тангенциально нагруженного стыка

Анализируя данную схему работы трения, можно выделить три элемента УФС: два зазора и элемент трения. Задача о моделировании трения с использованием МКЭ решена выше. Схема, описывающая работу трения для расчёта МКЭ, представлена на рис. 25.

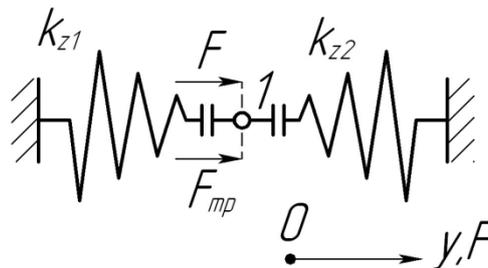


Рис. 25. Аналог схемы на рис. 24 для расчёта смещений с использованием МКЭ

Эта схема математически описывается следующим образом:

$$[k_{z1} + k_{z2}][y_1] = [F + F_{тр}] \quad 33$$

Рассмотрим частные случаи (см. табл., стрелка вверх указывает на увеличение силы F , стрелка вниз указывает на уменьшение силы F):

Анализ табл. показывает, что моделирование трения сделано успешно, что позволяет принять схему на рис. 25 как математический аналог тангенциально деформируемого стыка без учёта предварительного смещения.

Табл.2. Анализ силовых смещений в тангенциально деформируемом стыке (без учёта предварительного смещения).

№		F	F _{тр}	F + F _{тр}	k _{z1}	k _{z2}	y
1	↑	[0; T)	-F	0	1/0 = ∞	1/0 = ∞	0
2	↑	[T; 3T]	-T	(F - T) > 0	0	(F - T)/z ₂	z ₂
3	↓	[3T; T]	-T	(F - T) > 0	0	z ₂ k _{z2}	z ₂
4	↓	(0; T)	-F	0	y ₁ k _{z1}	y ₁ k _{z2}	z ₂
5	↓	0	0	0	y ₁ k _{z1}	y ₁ k _{z2}	z ₂
6	↓	(0; -T)	F	0	y ₁ k _{z1}	y ₁ k _{z2}	z ₂
7	↓	[-T; -T-2]	T	(T - F) < 0	z ₁ k _{z1}	0	z ₁
8	↑	(0; T)	F	0	y ₁ k _{z1}	0	z ₁
9	↑	0	0	0	y ₁ k _{z1}	y ₁ k _{z2}	z ₁
10	↑	(0; T)	-F	0	y ₁ k _{z1}	y ₁ k _{z2}	z ₁

Предварительное смещение заключается в том, что даже при наличии трения тело начинает двигаться сразу же как только к нему приложена сдвигающая сила. Сначала имеет место чисто упругая реакция стыка (участок 1 на рис. 26). При разгрузке движение будет по тому же участку 1, при полной разгрузке тело вернётся в исходное положение. Максимальное смещение на первом участке никогда не превышает 0,5 мкм. Потом идёт второй участок, наклон которого больше. На втором участке уже имеет место трение (подробнее об этом написано в работе [1]). Переход от первого участка ко второму наблюдается примерно при (0,7...0,8)T, где T — максимальная величина силы трения. Вторым участком наблюдается на диапазоне внешней силы (0,8...1)T, после чего начинается третий участок — скольжение одного тела по поверхности другого.

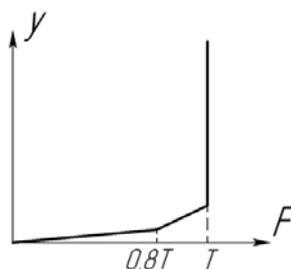


Рис. 26. Зависимость смещения в стыке от величины движущей силы F при учёте предварительного смещения

Моделирование учёта скольжения одного тела по поверхности другого уже проведено при решении задачи учёта трения без учёта предварительного смещения. Следовательно, остаётся смоделировать два участка. В работе [1] данное моделирование уже было сделано. Согласно работе [1], модель предварительного смещения выглядит как представлено на рис. 27. Однако данная модель требует некоторой коррекции. Дело в том, что при сложении смещений от первой и второй пружины по модели из работы [1] жёсткость второго участка должна быть не k_2 , а $(k_1+k_2)/(k_1k_2)$. Для того, чтобы исправить этот недочёт, вместо k_2 поставим $k_{2пр}$ (приведённое значение жёсткости, такое, чтобы при сложении смещений от двух пружин жёсткость второго участка получилась равной k_2).



Рис. 27. Реакции в системе (первый узел)

Для того, чтобы учитывать проскальзывание, к модели из работы [1] добавим модель трения, созданную в предыдущей задаче. В итоге получится полная модель трения, которая представлена на рисунке 28.

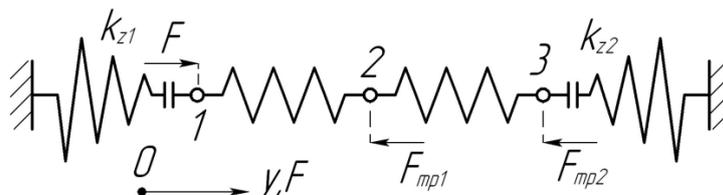


Рис. 28. Реакции в системе (первый узел)

Составим для данной системы разрешающее уравнение, используя МКЭ. Для этого пронумеруем узлы слева направо по порядку. Потом составим МЖЭ:

	0	1
0	k_{z1}	$-k_{z1}$
1	$-k_{z1}$	k_{z1}

Рис. 29. Матрица жёсткости элемента 1 (рис. 28)

	1	2
1	$k_{1\tau}$	$-k_{1\tau}$
2	$-k_{1\tau}$	$k_{1\tau}$

Рис. 30. Матрица жёсткости элемента 2 (рис. 28)

	2	3
2	$k_{2\tau\text{пр}}$	$-k_{2\tau\text{пр}}$
3	$-k_{2\tau\text{пр}}$	$k_{2\tau\text{пр}}$

Рис. 31. Матрица жёсткости элемента 3 (рис. 28)

	3	0
3	k_{z2}	$-k_{z2}$
0	$-k_{z2}$	k_{z2}

Рис. 32. Матрица жёсткости элемента 4 (рис. 28)

МЖК будет иметь вид, представленный на рисунке 33:

	1	2	3
1	$k_{z1}+k_{1\tau}$	$-k_{1\tau}$	0
2	$-k_{1\tau}$	$k_{1\tau}+k_{2\tau\text{пр}}$	$-k_{2\tau\text{пр}}$
3	0	$-k_{2\tau\text{пр}}$	$k_{2\tau\text{пр}}+k_{z2}$

Рис. 33 Матрица жёсткости конструкции

Вектор узловых смещений равен $[y_1, y_2, y_3]^T$, вектор узловых сил равен $[F, F_{\text{тр}1}, F_{\text{тр}2}]^T$, вектор коррекции U равен $[u_1, 0, u_2]$ В итоге решающее уравнение будет иметь следующий вид:

$$\begin{bmatrix} k_{z1}+k_{1\tau} & -k_{1\tau} & 0 \\ -k_{1\tau} & k_{1\tau}+k_{2\tau\text{пр}} & -k_{2\tau\text{пр}} \\ 0 & -k_{2\tau\text{пр}} & k_{2\tau\text{пр}}+k_{z2} \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} F \\ F_{\text{тр}1} \\ F_{\text{тр}2} \end{bmatrix} \quad 34$$

В настоящий момент автором проверены более простые аналоги рассматриваемой схемы, результаты моделирования которых можно распространить на рассматриваемую модель и в определённой степени утверждать о правильности моделирования (в схемах аналогах укорочена цепь пружин, образующих последовательную схему связи). Тем не менее, для окончательной уверенности в правильности моделирования автор планирует провести более детальный анализ смещений в системе, описываемой уравнением 34.

Нормально деформируемые стыки моделируются с использованием одного единственного модуля УФС, который отвечает за пластические деформации в УФС. Моделирование работы данного модуля для расчёта силовых смещений с использованием МКЭ описано в разделе.

В настоящий момент составлены модели как нормально, так и тангенциально деформируемого стыка, а также деформируемых деталей. Для полноценного расчёта силовых смещений и анализа доли влияния различных факторов на смещение конечного звена остаётся научиться рассчитывать силовые смещения в стыке, одновременно нагруженном нормальной и тангенциальной силой. Последним этапом в создании алгоритма автоматического расчёта и анализа силовой точности станков на стадии их проектирования является задача разработки программного алгоритма перехода от конструкции к системе, составленной из типовых элементов конструкции. После решения указанной задачи можно будет написать первую программу, которая может самостоятельно выделять факторы в станке, анализировать их влияние на точность обработки, считать силовую составляющую точности станка, а также находить слабое с точки зрения жёсткости звено.

Литература

1. *Чернянский П.М.* Основы проектирования точных станков. Теория и расчёт. - М.: КНОРУС, 2010. - 240 стр.
2. *Кузьмин М.А., Лебедев Д.Л., Попов Б.Г.* Прочность, жёсткость и устойчивость элементов конструкций. Теория и практикум: Решения задач механики методом конечных элементов / под ред. Б.Г. Попова. - М. : ИКЦ "Академкнига", 2008. - 160 с.
3. *Яворский Б.М., Детлаф А.А.* Справочник по физике. М.: Наука, 1977.

Секция №2
Инструментальная техника и технологии

УДК 621.99

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОЛЕБАНИЙ ПРИ РЕЗЬБОФРЕЗЕРОВАНИИ

Виталий Андреевич Косырев

*Студент 6 курса,
кафедра «Инструментальная техника и технологии»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: О.В. Мальков,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Инструментальная техника и
технологии»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

В современном машиностроении наблюдается тенденция существенного увеличения скорости резания путем применения новых инструментальных материалов с износостойкими покрытиями, что приводит к росту вибраций в зоне резания. Вибрации в зоне резания являются причиной уменьшения производительности обработки резанием, уменьшения точности, снижения стойкости инструмента и т.д. В данной работе производится исследование влияния вибраций на точность обработки резьб при резьбофрезеровании. Первостепенной задачей является оценка степени значимости данного влияния. В случае его высокой значимости следует произвести определение параметров обработки резьбы, влияющих на величину параметров вибраций, с целью снижения влияния вибраций в зоне резания на точность.

Сравнительно массивные подвижные узлы и детали, невысокая жесткость узлов, а также подвижных и неподвижных стыков, несовпадение центров жесткости с центрами масс определяют необходимость рассмотрения многомассовой системы со многими степенями свободы.

На первоначальном этапе произведено упрощенное моделирование процесса резьбонарезания для одномассовой диссипативной системы с одной степенью свободы с возбуждающей силой $F(t)$. Схематически данная модель представлена на рис. 1.

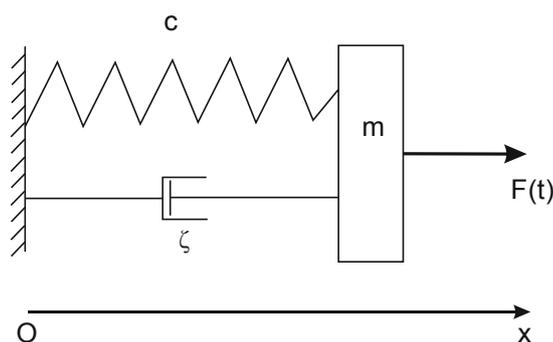


Рис. 1. Одномассовая диссипативная система с одной степенью свободы и с возбуждающей силой $F(t)$.

Данная система описана уравнением:

$$m\ddot{x} + R(\dot{x}) + cx = F(t), \quad (1)$$

где x – координата, вдоль которой совершаются колебания, мм; m – приведенная масса системы, кг; c – жесткость системы, $\frac{\text{кг} \cdot \text{рад}^2}{\text{с}^2}$; $R(\dot{x})$ – слагаемое, отражающее влияние

диссипации в системе, мН [1]. Данная модель имеет четыре составляющие, подлежащие отдельному моделированию: масса m , жесткость c , диссипативная сила R , возбуждающая сила $F(t)$.

Возбуждающим силовым воздействием в данной модели является сила резания. Вдоль направления действия этой силы направлена ось x (рис. 1).

Были рассмотрены теоретическая и эмпирическая модели силы резания при резбозерезовании.

Теоретическая модель позволяет рассчитать силу резания в зависимости от геометрических параметров заготовки, инструмента, нарезаемой резьбы, подачи на зуб фрезы и положения зуба фрезы в заготовке (рис. 2).

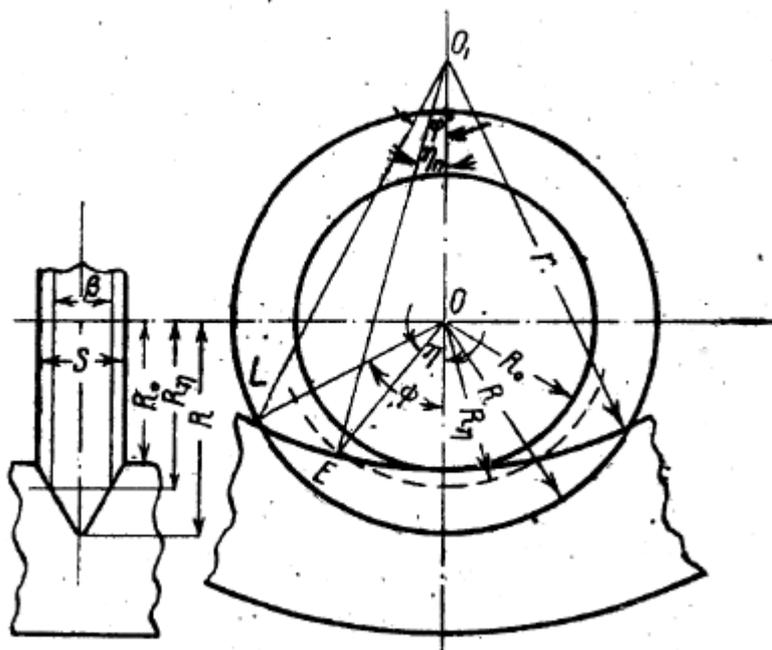


Рис. 2. Схема фрезерования внутренней резьбы

$$\text{Сила рассчитана через крутящий момент: } P_z = \frac{M_{\text{кр}}}{R} \cdot g,$$

где P_z - искомая сила, Н; R - радиус вершин резьбовой фрезы, мм; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ - гравитационная постоянная; $M_{\text{кр}}$ - крутящий момент на фрезе, кг·мм.

Рассмотрен случай участия в резании одного зуба фрезы на каждой нитке [3].

$$M_{\text{кр}} = k \cdot S_z^{\mu+1} \cdot \left(\frac{e}{r}\right)^{\mu+1} \cdot \frac{1}{S} \cdot R \cdot b \cdot \sin^{\mu+1} \eta, \quad (2)$$

где k - безразмерный коэффициент, зависящий от качества обрабатываемого материала и профиля зуба фрезы. Для стали средней твердости с пределом прочности 500 МПа $k = 242$, S_z - подача на зуб фрезы, мм/зуб; r - радиус вершин изделия, мм; e - расстояние между осями фрезы и обрабатываемой заготовки, мм; l - длина нарезки, мм; s - шаг резьбы, мм; η - мгновенный угол, определяющий положение зуба фрезы, рад; μ - безразмерный коэффициент, равный для стали - 0,25; b - ширина рабочей части профиля зуба фрезы, мм (рис. 2).

$$b = 2 \cdot (R - R_{\eta}) \cdot \tan \tan \frac{\beta}{2},$$

где β - угол профиля резьбы, рад; R_η – радиус бесконечно узкой фрезы, для которой мгновенный угол зуба η является углом охвата, мм. По теореме косинусов:

$$R_\eta = \sqrt{r^2 + e^2 - 2 \cdot r \cdot e \cdot \cos \cos \eta_n},$$

где η_n – угол, определяющий положение точки С, лежащей на поверхности заготовки и являющейся точкой ее пересечения с поверхностью бесконечно узкой фрезы, для которой мгновенный угол зуба η является углом охвата, рад (рис. 2).

$$\eta_n = \eta \cdot \frac{R_0}{r},$$

где R_0 – наименьший радиус профиля зуба фрезы, мм.

Мгновенный угол η был выражен через время и частоту вращения фрезы:

$$\eta = \frac{\pi \cdot n \cdot t}{30} \quad (3),$$

где n – частота вращения фрезы, об/мин; t – время, с.

Окончательно формула для определения силы резания записана следующим образом:

$$P_z = 242 \cdot S_z^{0,75} \cdot \left(\frac{e}{r}\right)^{0,75} \cdot \frac{1}{S} \cdot g \cdot \left(R - \sqrt{r^2 + e^2 - 2 \cdot r \cdot e \cdot \cos \cos \left(\frac{\pi \cdot n \cdot t}{30} \cdot \frac{R_0}{r} \right)} \right) \cdot \tan \tan \frac{\beta}{2} \cdot \sin^{0,75} \left(\frac{\pi \cdot n \cdot t}{30} \right) \quad (4)$$

Таким образом, значение силы резания для случая, если в резании участвует m зубьев на каждой нитке равно:

$$P_z = 242 \cdot S_z^{0,75} \cdot \left(\frac{e}{r}\right)^{0,75} \cdot \frac{1}{S} \cdot g \cdot \sum_{i=1}^m \left(b_i \cdot \sin^{0,75} \left(\frac{\pi \cdot n \cdot t}{30} - (i-1) \cdot \varphi_0 \right) \right),$$

где b_i - ширина рабочей части профиля i -го зуба фрезы, участвующего в резании, мм.

$$b_i = 2 \cdot \left(R - \sqrt{r^2 + e^2 - 2 \cdot r \cdot e \cdot \cos \cos \left(\left(\frac{\pi \cdot n \cdot t}{30} - (i-1) \cdot \varphi_0 \right) \cdot \frac{R_0}{r} \right)} \right),$$

где φ_0 – угловой шаг между зубьями фрезы, рад.

$$\varphi_0 = \frac{2\pi}{z},$$

где z - количеством зубьев у фрезы, шт.

Вывод эмпирической зависимости произведен в соответствии с [2] и [4]. Составляющие силы резания представлены в виде:

$$F_t(t) = K_{t1} \cdot u(t) \cdot h(t) + K_{t2} \cdot u(t) - \text{окружная составляющая силы резания.}$$

$$F_n(t) = K_{n1} \cdot u(t) \cdot h(t) + K_{n2} \cdot u(t) - \text{радиальная составляющая силы резания.}$$

Здесь: K_{t1} , K_{t2} , K_{n1} , K_{n2} – безразмерные эмпирические коэффициенты; $u(t)$ - толщина срезаемого слоя одним зубом для данного момента времени, мм; $h(t)$ - ширина срезаемого слоя одним зубом для данного момента времени, мм.

Расчет толщины и ширины срезаемого слоя произведен по [2]:

$$u(t) = S_z \cdot \sin \left(\frac{\pi}{3} - \frac{\pi \cdot n \cdot t}{30} \right) \cdot \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) - \text{на участке резания зуба до достижения им}$$

вертикальной оси;

$u(t) = S_z \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot n \cdot t}{30}\right) \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)$ - на участке резания зуба после прохождения им вертикальной оси;

$$h(t) = \frac{b_1}{\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}; \text{ где } b_1 = S - 2 \cdot b_{\eta},$$

где S - ширина резбифрезы, мм (рис. 2).

$$S = 2 \cdot (R - R_0) \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right),$$

где R - радиус вершин резбифрезы, мм; R_0 - наименьший радиус профиля зуба фрезы, мм; b_{η} - ширина участка зуба фрезы, погруженного в заготовку, мм.

$$b_{\eta} = (R_{\eta} - R_0) \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)$$

В данных формулах аргументом тригонометрических функций служит значение угла η (3). Поскольку этот угол отмеряется от вертикальной оси, то аргументом тригонометрических функций в зависимости от времени на участке резания зуба до достижения им вертикальной оси является выражение: $\frac{\pi}{3} - \frac{\pi \cdot n \cdot t}{30}$. Аргументом тригонометрических функций в зависимости от времени на участке резания зуба после прохождения им вертикальной оси является выражение: $\frac{\pi \cdot n \cdot t}{30}$

Методика определения данной эмпирической зависимости разработана на основе [2]:

- 1.1 При помощи динамометра Kistler определяются составляющие силы резания F_x , F_y при резбифрезеровании в неподвижной системе координат, связанной со станком (x, y).
- 1.2. Пересчитываются значения составляющих силы резания из проекций F_x , F_y на оси неподвижной системы координат, связанной со станком (x, y), в проекции F_x , F_y на оси подвижной системы координат, связанной с инструментом (t, n) (рис. 5).
- 1.3. После пересчета определяется среднее значение максимумов окружной и радиальной составляющих силы резания.
- 1.4. Далее из построенных графиков составляющих вычленяется один цикл действия силы с максимумом, максимально близким к среднему.
- 1.5. Для вычисления значений коэффициентов K_{t1} , K_{t2} , K_{n1} , K_{n2} , применяется алгоритм Нелдера-Мида, при помощи функции Matlabfminsearch, реализующей данный алгоритм.
- 1.6. В зависимости от полученных результатов может понадобиться внести коррекцию в найденные коэффициенты K_{t1} , K_{t2} , K_{n1} , K_{n2} , в виде поправочных коэффициентов.
- 1.7. Эта часть работы осуществлена на координатно-расточном станке с ЧПУ модели 24K40СФ4 кафедры МТ2.

Технологический эскиз резбонарезания представлен на рис. 4.

Обработка осуществляется при следующих условиях:

Обрабатываемый материал: Д16Т; инструмент: Фреза 327-16B32ЕС-09 с пластиной 327R09-18 350ММ-ТНSandvikCoromant.

Геометрические параметры инструмента: передний угол: 4° ; задний угол: 19° ; количество зубьев: 3; диаметр вершин резбофрезы: $D=17,642$ мм.

Геометрические параметры отверстия заготовки: диаметр: 30 мм; длина: 20 мм; расстояние между осями резбофрезы и заготовки: $e=8,47$ мм.

Геометрические параметры витка нарезаемой резьбы: диаметр впадины витка: 34,64 мм; шаг: 2,68 мм; угол профиля нарезаемой резьбы: $\beta = 60^\circ$. Натуральная резьба заменялась фрезерованием канавки треугольного профиля.

Режим обработки: глубина резания: $t=2,32$ мм; подача на зуб:; частота вращения шпинделя: $n=1600$ об/мин (скорость резания: $v = 88,92$ м/мин); круговая подача: $S_{кр}=240$ мм/мин ($S_z = 0,05$ мм/зуб).

Пересчет осуществлен по формуле, представленной в [2]:

$$\begin{pmatrix} F_t \\ F_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \cos \theta & \sin \sin \theta \\ \sin \sin \theta & -\cos \cos \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix},$$

где θ – угол между вертикалью и радиальной составляющей силы резания, рад.

Данный угол складывается из угла η (3) и углового положения фрезы в отверстии при ее планетарном движении.

График составляющих силы резания имеют циклическую структуру с периодом цикла, равным $\frac{1}{n \cdot z}$, где $z=3$ – количество зубьев.

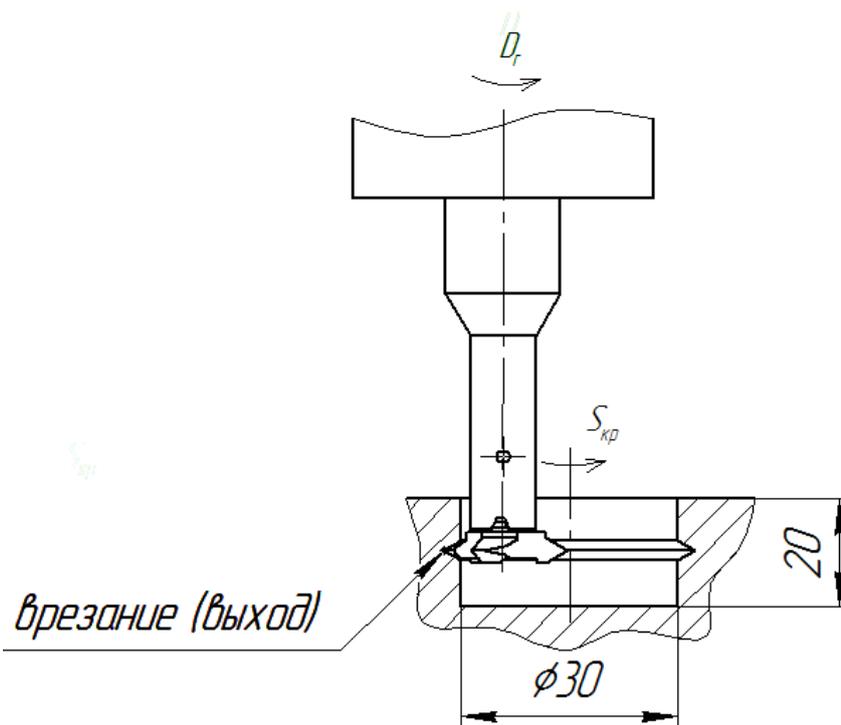


Рис. 4. Технологический эскиз резбонарезания

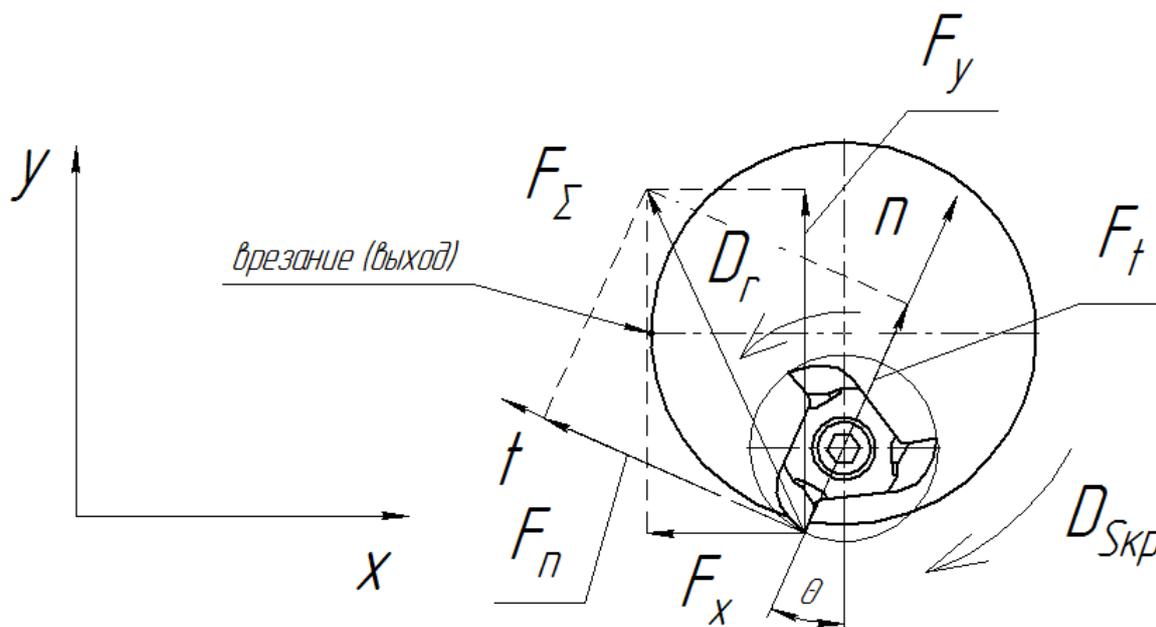


Рис. 5. Проекция силы резания на оси подвижной и неподвижной системы координат

Система вычисляет значения коэффициентов K_{t1} , K_{t2} , K_{n1} , K_{n2} , благодаря которым значения составляющих силы $F_t(t) = K_{t1} \cdot u(t) \cdot h(t) + K_{t2} \cdot u(t)$ и $F_n(t) = K_{n1} \cdot u(t) \cdot h(t) + K_{n2} \cdot u(t)$ приближаются к значениям силы из вычлененного цикла, полученным экспериментально.

Для реализации данного алгоритма необходимо некоторое количество итераций, т.к. необходимо правильно задаться начальными значениями коэффициентов K_{t1} , K_{t2} , K_{n1} , K_{n2} . Правильные начальные значения коэффициентов можно определить только методом подбора. Найденные коэффициенты являются постоянными для данного режима резания.

После реализации резбозерезования были получены следующие значения силы резания в проекциях на оси неподвижной системы координат (x, y) (рис.6).

Как видно из рис. 6, графики описывают тригонометрическую зависимость, друг относительно друга они смещены на $\pi/2$.

Далее был произведен пересчет проекций силы на оси неподвижной системы координат в проекции силы на оси подвижной системы координат (см. пт.1.2.). Была подсчитана только окружная составляющая силы.

Результаты представлены на рис. 7, 8.

Рис. 8 представляет собой увеличенный участок графика из рис. 7. Как видно из графиков, максимум силы постоянно меняется в зависимости от времени. По теории на каждом цикле сила должна достигать одного и того же максимума, т.к. условия резания у каждого режущего зуба, внедряющегося в металл, одинаковы.

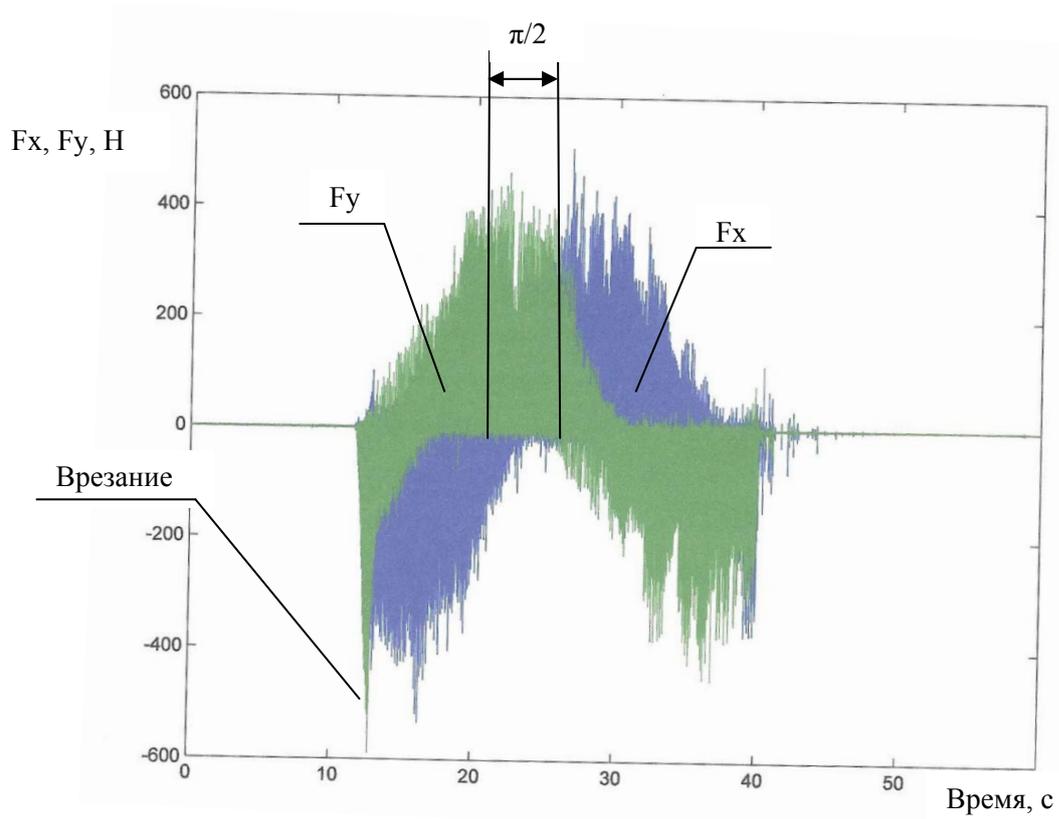


Рис. 6. Экспериментальные значения силы резания в проекциях на оси неподвижной системы координат

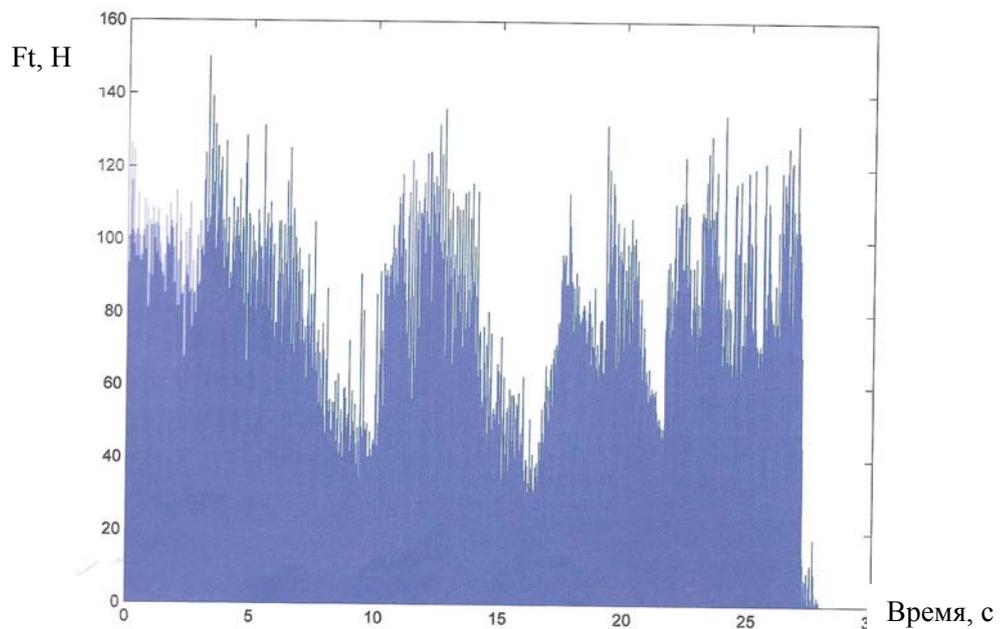


Рис. 7. Окружная составляющая силы резания

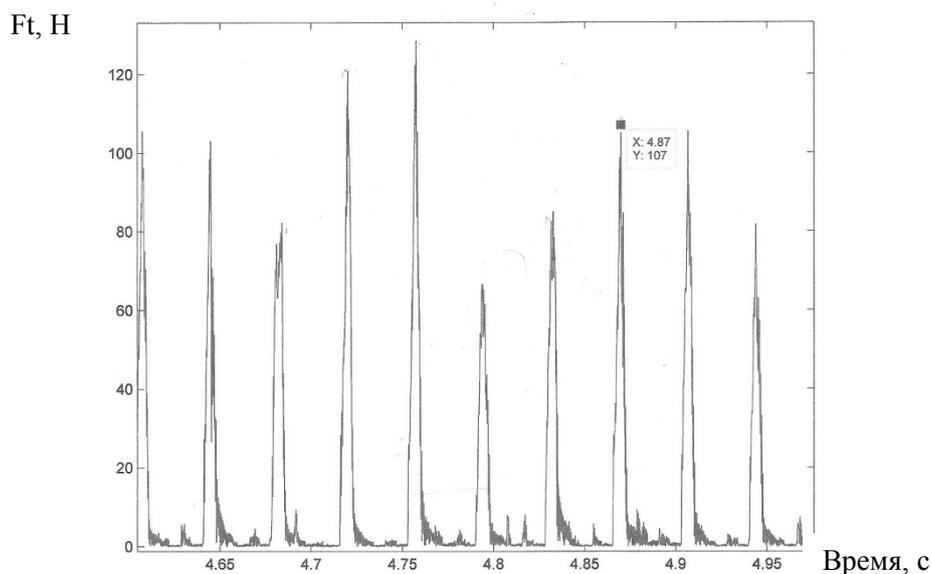


Рис. 8. Увеличенный участок графика окружной составляющей силы резания

Оказался несоответствующим ожиданиям период каждого цикла: по теории он должен быть равен $\frac{1}{n \cdot z}$, что для данных условий обработки равно 0,0125 секунд.

Однако на графике средний период равен приблизительно 0,0375 секунд, то есть в три раза больше ожидаемого. Это говорит о том, что в резании участвует только один зуб. Это подтверждено наблюдениями зубьев самой фрезы после работы: следы резания обнаружены только на одном зубе из трех. Объяснение данного несоответствия следует осуществить в дальнейшем. В качестве одной из версий предложено, что вибрации фрезы при резании имели частоту, близкую к собственной частоте вибраций фрезы вместе с патроном и шпинделем станка, однако замеры, произведенные при помощи резонансного молотка показали, что частота собственных колебаний фрезы с патроном и шпинделем станка в три раза превышает значения частоты вращения шпинделя и равно приблизительно 83 Гц. Также было выражено предположение, что в резании участвует только один зуб, по причине сильного радиального биения фрезы в цанговом патроне. Однако замеры биения показали, что два зуба из трех находятся на одной и той же окружности с точностью до микрометра, а значит находятся в резании.

Далее было вычислено среднее значение максимумов окружной составляющей силы резания, которое оказалось равным 63 Н.

Далее из построенных графиков составляющих был вычленен один цикл действия силы с максимумом, максимально близким к среднему.

График этого цикла представлен на рис. 9:

Для вычлененных значений был применен алгоритм Нелдера-Мида для вычисления коэффициентов K_{t1} , K_{t2} формулы $F_t(t) = K_{t1} \cdot u(t) \cdot h(t) + K_{t2} \cdot u(t)$ при помощи функции `Matlabfminsearch`, реализующей данный алгоритм.

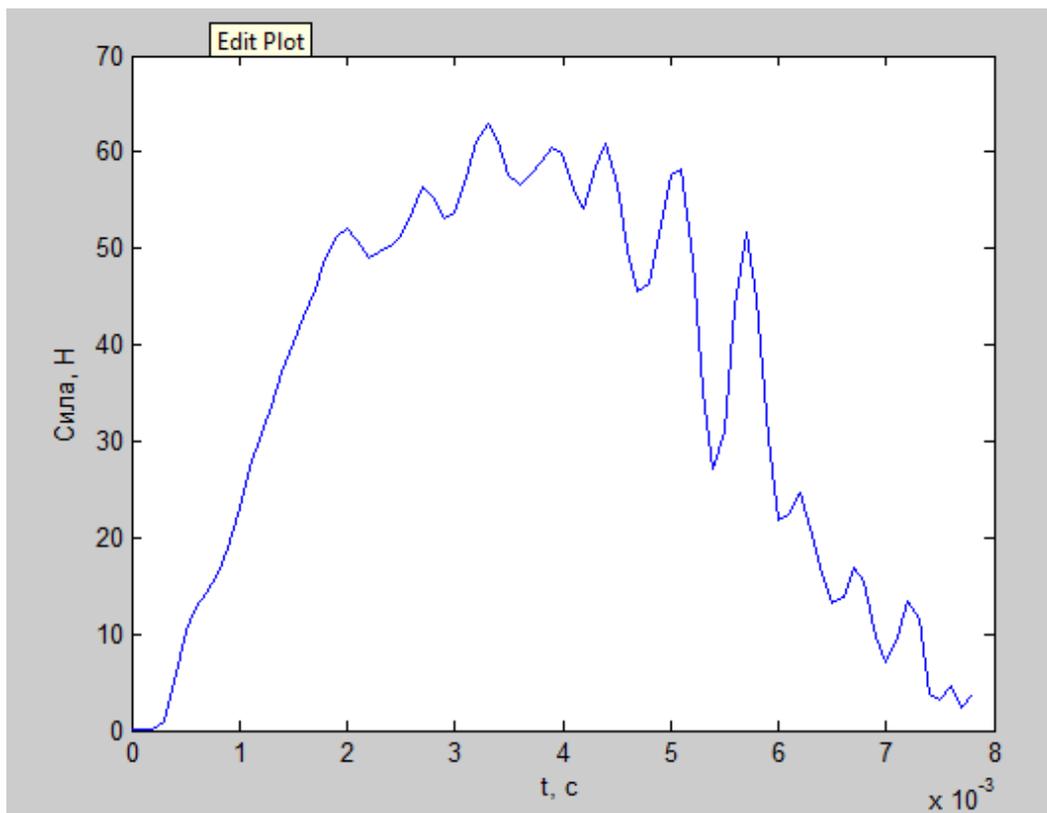


Рис. 9. цикл действия силы с максимумом, максимально близким к среднему

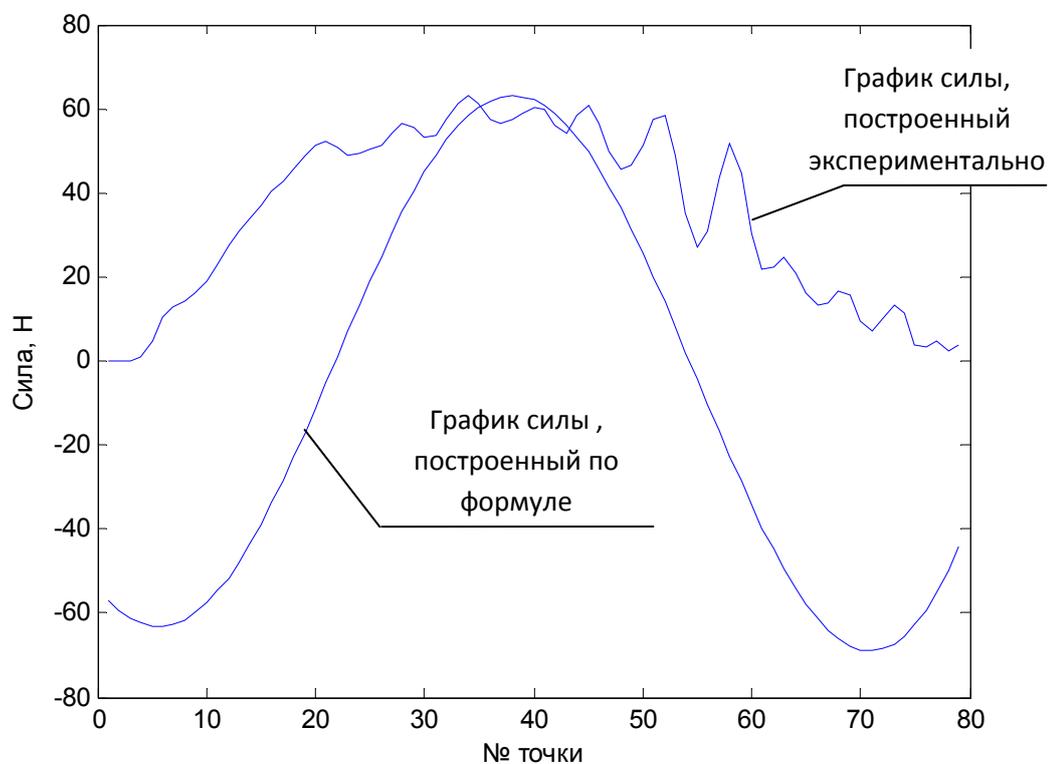


Рис. 10. Графики силы, полученной экспериментально и силы вычисленной по полученной формуле для одного цикла

Система вычисляет значения коэффициентов K_{11} , K_{12} , благодаря которым значения окружной силы, вычисленной по формуле $F_t(t) = K_{11} \cdot u(t) \cdot h(t) + K_{12} \cdot u(t)$, приближаются к значениям силы из вычлененного цикла, полученным экспериментально.

Значения коэффициентов получены равными: $K_{11} = 0,0011$, $K_{12} = 0,001$.

Таким образом полученное уравнение выглядит следующим образом:

$$F_t(t) = 0,0011 \cdot b(t) \cdot h(t) + 0,001 \cdot b(t)$$

Однако значения силы, полученные по данной формуле получились меньше экспериментальных примерно в 716426 раз. Именно на это число домножаются коэффициенты K_{11} , K_{12} .

Таким образом, получается следующее уравнение окружной силы:

$$F_t(t) = 788 \cdot b(t) \cdot h(t) + 716,4 \cdot b(t)$$

На рис. 10 представлены два графика: силы, полученной экспериментально и силы вычисленной по полученной формуле для одного цикла.

В результате анализа графиков сделаны следующие выводы:

Положительные результаты моделирования окружной составляющей силы резания:

1. График силы, вычисленной по формуле, имеет один максимум.
2. Максимум силы, вычисленной по формуле, совпадает с максимумом силы, полученной экспериментально, по абсолютному значению (63 Н).
3. Положение максимума силы, вычисленной по формуле, приблизительно совпадает с максимумом силы, полученной экспериментально.

Отрицательные результаты моделирования окружной составляющей силы резания:

1. Имеется достаточно большая разница (около 100%) между силой, вычисленной по формуле, и силой, полученной экспериментально, в начале и в конце цикла.
2. В начале и в конце цикла сила заходит в отрицательную область, чего на практике быть не может.

Объяснения отрицательных результатов:

Отрицательные результаты объясняются неточностью формул для подсчета толщины и ширины срезаемого слоя, взятых из [2]. Точные формулы для вычисления этих параметров для резбобрезерования отсутствуют в литературе, и выводом этой формулы следует заняться в дальнейшем.

Далее была осуществлена подстановка описанных моделей окружной силы резания в дифференциальное уравнение колебаний [1] вида:

$$\ddot{x} + 2q\dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{1}{m} F_t(t); \text{ где } \omega_0 = 167,55 \text{ рад/с} - \text{ частота собственных колебаний,}$$

получающаяся из частоты вращения шпинделя; q - коэффициент демпфирования (1/с).

$$q = \xi \omega_0, \text{ где } \xi = 0,03 - \text{ коэффициент.}$$

$$q = \xi \omega_0 = 0,03 \cdot 167,55 = 5,03 \text{ 1/с}$$

$m = 0,1$ кг – приведенная масса системы в первом приближении принятая массе резбобрезы [6].

$F_1(t)$ - вынуждающая сила, равная окружной составляющей силы резания.

Таким образом, окончательно дифференциальное уравнение (ДУ) имеет вид:

$$\ddot{x} + 10,053 \cdot \dot{x} + 28073,541 \cdot x = 10 \cdot F_1(t) \quad (5)$$

ДУ численно решено в приложении MATLAB 7.10.0. при помощи солвераode23 (функции, позволяющей решить ДУ второго порядка одношаговым методом, использующим модифицированную формулу Розенборка второго порядка).

Решение найдено для трехзубой односточной резцовфрезы. Диаметры заготовки и фрезы подобраны так, чтобы в работе участвовал только один зуб, причем одновременно с выходом из заготовки одного зуба в нее внедрялся следующий.

Аргументом тригонометрических функций служит значение угла η (3). Поскольку этот угол отмеряется от вертикальной оси, то аргументом тригонометрических функций в зависимости от времени на участке резания зуба до достижения им вертикальной оси является выражение: $\frac{\pi}{3} - \frac{\pi \cdot n \cdot t}{30}$. Аргументом тригонометрических функций в зависимости от времени на участке резания зуба после прохождения им вертикальной оси является выражение: $\frac{\pi \cdot n \cdot t}{30}$.

Таким образом видно, что разные промежутки времени работы фрезы внутри одного оборота описаны разными ДУ, а значит решение находится «склеивкой» решений данных уравнений при помощи начальных условий. При этом начальными условиями для каждого следующего ДУ служат значения координаты и скорости в последней точке решения предыдущего ДУ.

Результат решения при использовании эмпирической формулы силы представлен на рис. 11, 12.

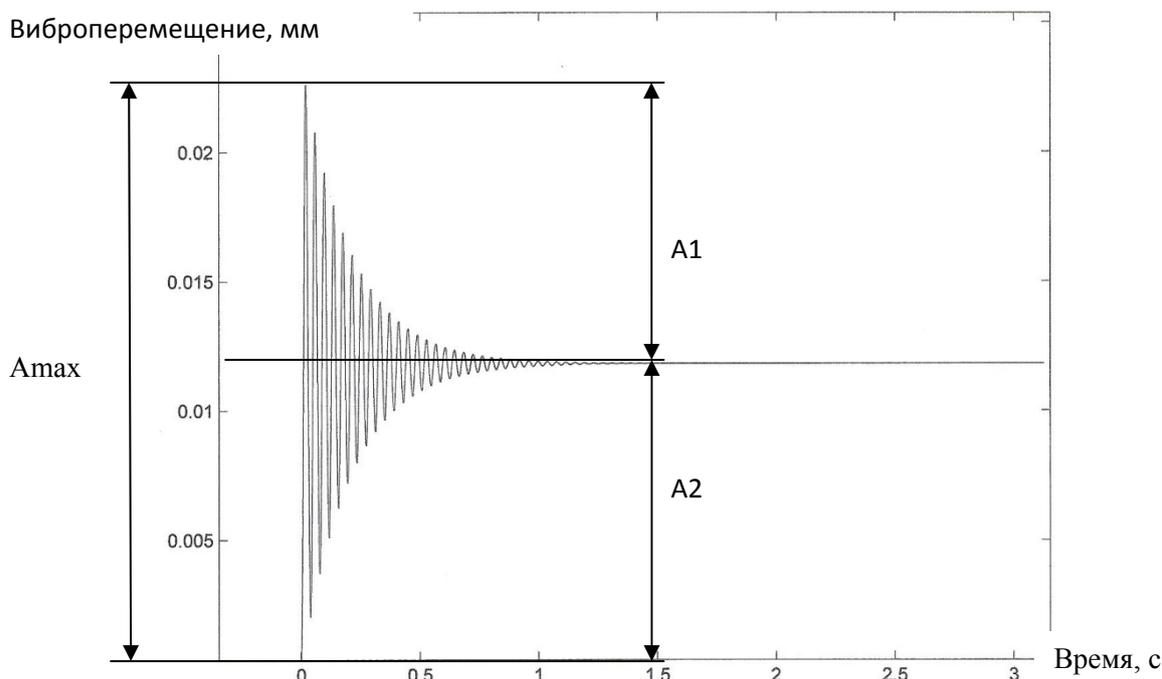


Рис. 11. Графическое решение дифференциального уравнения при использовании эмпирической формулы силы

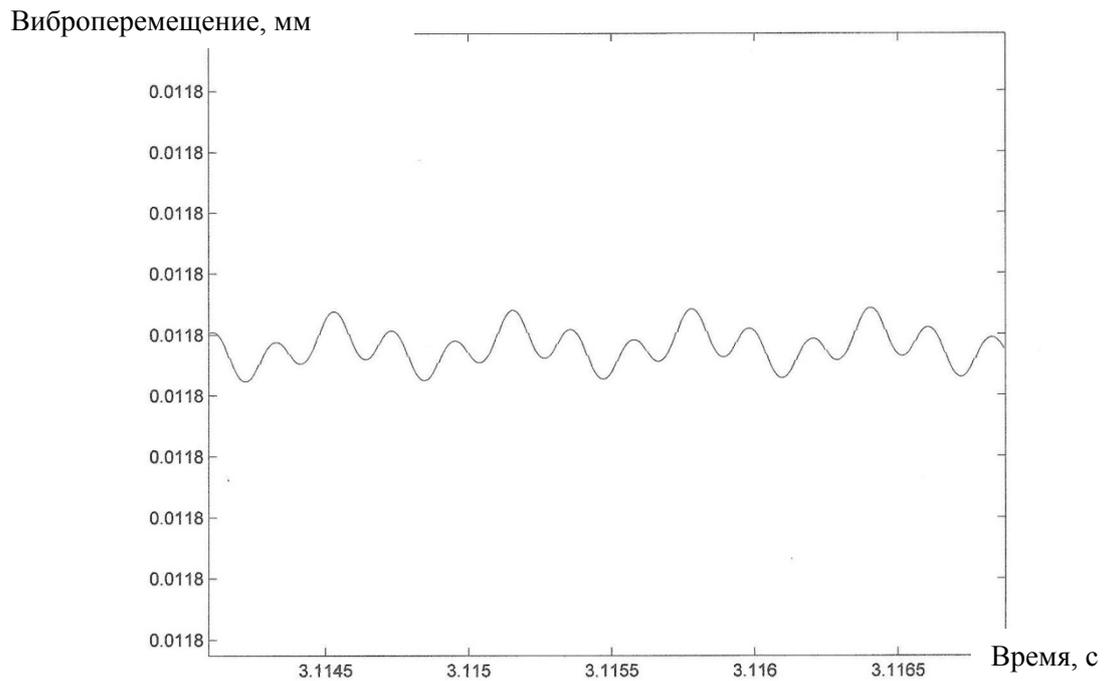


Рис. 12. Увеличенный участок графического решения при использовании эмпирической формулы силы

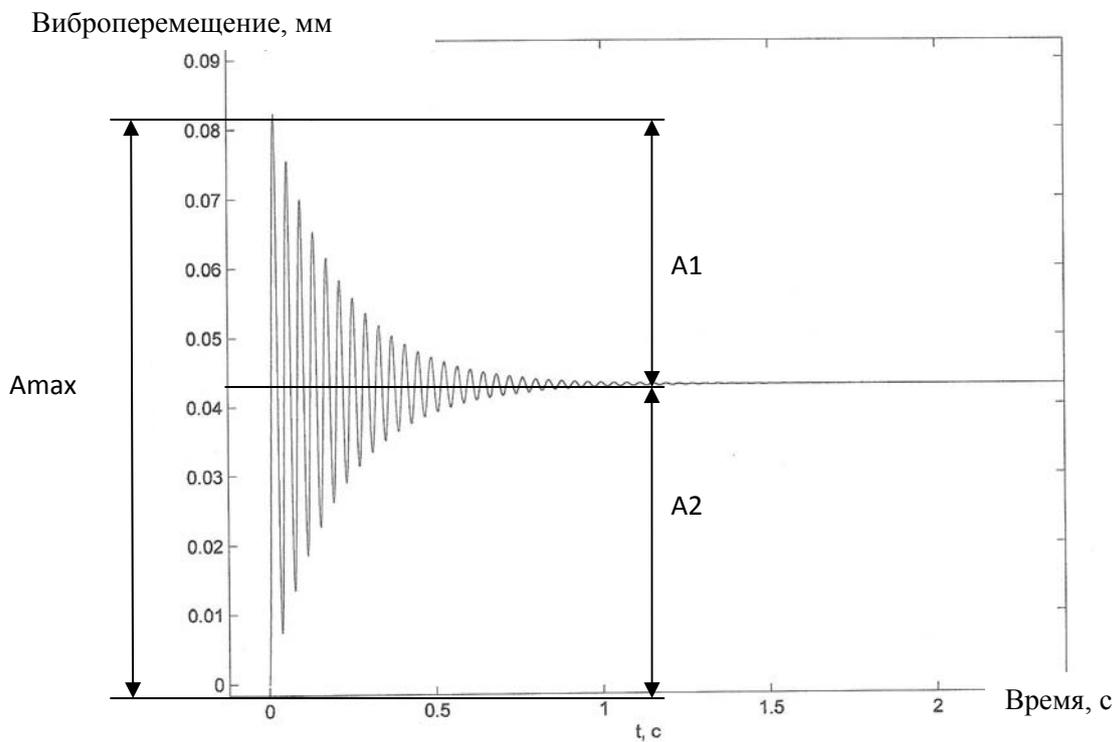


Рис. 13. Графическое решение дифференциального уравнения при использовании теоретической формулы силы

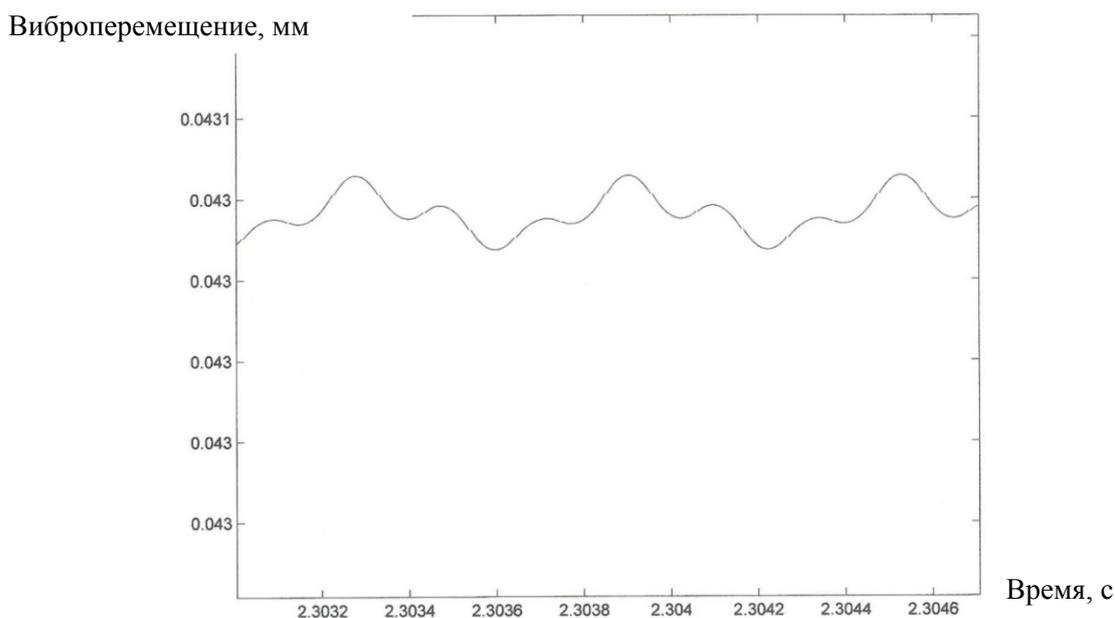


Рис. 14. Увеличенный участок графического решения при использовании теоретической формулы силы

На рис. 11 представлен общий график виброперемещений. В первоначальный момент времени происходит резкий всплеск перемещений до значения $A_{\max}=25,5$ мкм. Далее происходит стабилизация колебаний вокруг значения $A_2=11,828$ мкм. На рис. 12 представлен участок кривой виброперемещений на участке после стабилизации. Из него видно, что коридор значений виброперемещений вокруг значения A_2 равен $1,122$ нм.

Результат решения при использовании теоретической формулы силы представлен на рис. 13, 14. По оси ординат отложено виброперемещение в мм, по оси абсцисс отложено время в секундах.

Рис. 13 представляет собой общий график виброперемещений. В первоначальный момент времени происходит резкий всплеск перемещений до значения $A_{\max}=83$ мкм. Далее происходит стабилизация колебаний вокруг значения $A_2=43,049$ мкм. Рис. 14 представляет собой участок кривой виброперемещений на участке после стабилизации. Из него видно, что коридор значений виброперемещений вокруг значения A_2 равен $4,591$ нм.

Для определения приведенной массы, жесткости и демпфирования системы была разработана следующая методика.

1.1. Производится виброударное тестирование с использованием вибромолотка.

1.2. Строится амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) колебаний фрезы с патроном и шпинделем.

1.3. Строится график зависимости силы удара вибромолотком от времени.

1.4. По полученным графикам определяются искомые параметры для модели с двумя степенями свободы. В данном случае колебания раскладываются на радиальную и окружную составляющие. При этом коэффициент демпфирования определяется из АЧХ, а приведенная масса и жесткость – из АЧХ и графика зависимости силы удара вибромолотком от времени.

На рис. 15 представлен процесс формирования профиля нарезаемой резьбы зубом резьбообразующей части инструмента. Из рисунка видно, что впадина

нарезаемой внутренней резьбы (поз. 1) формируется при последовательном (поз. 2) перемещении инструмента (поз. 3) вдоль пространственной траектории движения (поз. 4). В результате вибраций при резьбофрезеровании фреза отклоняется, в том числе, и в радиальном направлении от заготовки, и находится в коридоре между пространственной траекторией движения (поз. 4) и линией отклонения зуба фрезы в результате вибраций (поз. 5), а значит, полученная резьба может выходить за пределы допуска по среднему диаметру и диаметру вершины [5].

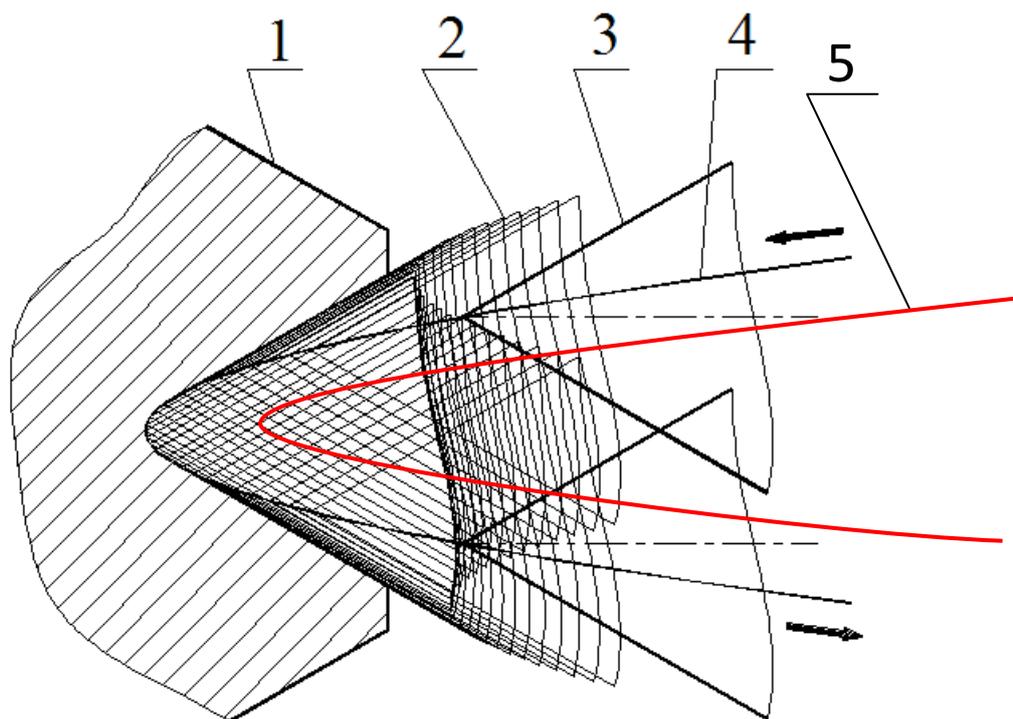


Рис. 15. Влияние виброперемещений на точность резьбофрезерования

В проведенном эксперименте фрезеруется резьба с номинальным диаметром 30 мм и шагом 2,68 мм. По ГОСТ 16093-81 выбрана ближайшая по величине шага резьба: М30х3. Данная резьба, выполняемая по третьей степени точности (как по самой точной), имеет допуск на средний диаметр, равный 85 мкм. Самое высокое значение виброперемещений, полученное входе решения дифференциального уравнения было равно 83 мкм, то есть не вышло за поле допуска.

Допуск на диаметр вершин данной резьбы, выполненной по четвертой (наивысшей) степени точности, равен 280 мкм, то есть значительно выше допуска на средний диаметр. Допуск на диаметр впадин внутренней резьбы стандартом не предусмотрен.

По результатам работы был сделан вывод: при данных условиях эксперимента виброперемещения не превышают величины допусков на диаметр вершин и на средний диаметр.

Литература

1. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. – М.: Высшая школа, 1980. – 408 с.
2. Anna Carla Araujo, Jose Luis Silveira, Shiv Kapoor. Force prediction in thread milling. – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 18-21 мая 2003.
3. Зорохович А.А. Резьбофрезерование и резьбофрезерные станки. – М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1940. – 148 с.
4. Altintas Y. Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and cnc design. – Cambridge University press, 2000 – 286 с.
5. Мальков О.В. Исследование точности резьбы при резьбофрезеровании сверло-резьбофрезой. – Наука и образование, №11, ноябрь 2007.
6. Грубый С.В. Моделирование процесса резания твердосплавными и алмазными резцами: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2010. – 107с.

Секция №3
Технологии машиностроения

УДК 536.629.7

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОРМОЖЕНИЯ В ГИПЕРЗВУКОВЫХ ПОТОКАХ

Эдуард Сергеевич Бирюков⁽¹⁾, Юрий Владимирович Жилин⁽²⁾

Аспирант кафедры «Теплофизика»⁽¹⁾, научный консультант, кандидат технических наук, начальник отделения НИО-8 ЦАГИ⁽²⁾

*Научный руководитель: В.Н. Афанасьев,
доктор технических наук, профессор кафедры «Теплофизика»*

Современная авиация стоит на рубеже перехода от околозвуковых и умеренных сверхзвуковых ($1 < M < 3$) скоростей полета к гиперзвуковым скоростям. Ракетная техника и космонавтика изначально имели дело с гиперзвуком (M до 22). Поэтому исследования в этой области науки являются весьма актуальными.

Несмотря на значительные, особенно в последние годы, успехи теоретических, преимущественно численных методов исследования, в разработке конструкций гиперзвуковых летательных аппаратов нельзя обойтись без проведения сложных и дорогостоящих экспериментов.

Большим преимуществом здесь обладают экспериментальные установки импульсного действия с длительностью эксперимента от 1 до 100 миллисекунд. Эти установки значительно дешевле в эксплуатации по сравнению с аэродинамическими трубами длительного действия. Часто в импульсном процессе удается получить существенно более широкий диапазон изменения параметров гиперзвукового течения: давление и температуру торможения, числа Маха, Рейнольдса, Нуссельта и др.

Однако, при столь явных преимуществах, импульсные аэродинамические установки имеют и существенный недостаток: кратковременность процесса предъявляет жесткие требования к инерционности регистрирующей аппаратуры. Если усредненные за время эксперимента значения давления торможения ещё удаётся непосредственно измерить современными малоинерционными датчиками, то температуру торможения приходится определять расчетным путем [1], что существенно снижает ценность эксперимента как такового.

В работе [2] было показано, что классические методы измерения параметров торможения в аэродинамических потоках длительного действия нельзя применить к кратковременным импульсным процессам в силу того, что за время эксперимента ~ 40 мс параметры торможения изменяются во времени и носят неустановившийся характер.

Гиперзвуковая ударная труба УТ-1М, подробное описание которой приведено в [1, 2] много лет используется в ЦАГИ (г. Жуковский) для исследования теплообмена при аэродинамическом нагреве летательных аппаратов. Она может работать в двух режимах: как «классическая» ударная труба (рис. 1), с максимально возможной длительностью эксперимента 5 мс, и как «труба Людвига» (рис. 2), с длительностью эксперимента от 20 до 40 мс.

До сих пор параметры торможения потока определялись исключительно расчётным путём в предположении постоянства температуры по длине и сечению канала высокого давления. Для проверки справедливости этого предположения было разработано и сконструировано устройство, оснащенное термопарами типа «хромель — копель» (рис. 3).

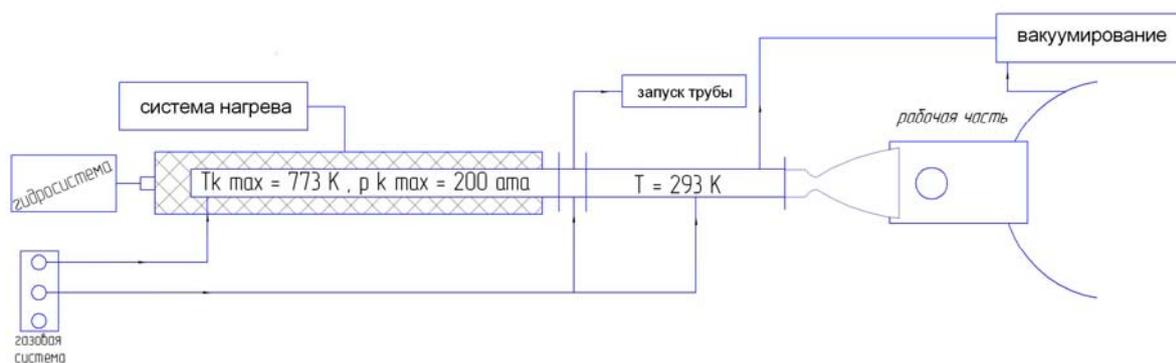


Рис. 1. Схема ударной аэродинамической трубы УТ-1М

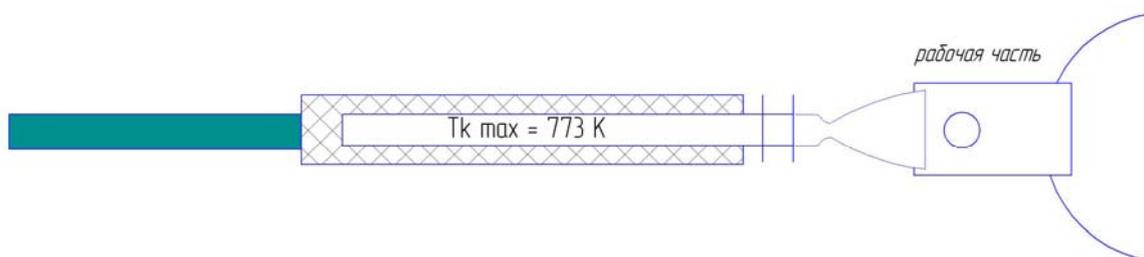


Рис. 2. Аэродинамическая ударная труба УТ-1М в режиме «трубы Людвига»

Камера высокого давления трубы оснащена 6-ю секциями электрических нагревателей по 2м каждая. В семи сечениях (1-7) трубы (рис. 3) установлены фасонные металлические центрирующие крестовины, на каждой из которых закреплены по четыре термопары типа «хромель-копель». Крестовины крепятся на центрирующей «штанге» – нержавеющей трубке диаметром 4 мм, предположительно в самых «горячих», «холодных», а также «промежуточных» сечениях трубы.

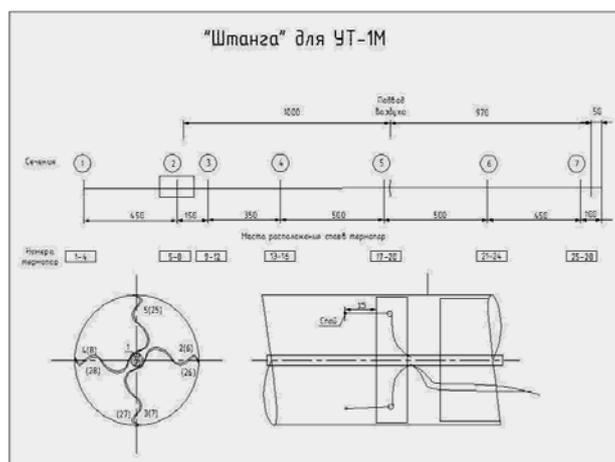


Рис. 3. Устройство для измерения полей температур

Для уменьшения искажения при измерениях температурного поля спаи термопар вынесены за пределы крестовин на 15 мм.

С торца «штанги» установлен цилиндрический керамический теплоизолятор из материала ТЗМК-10 и прочный стальной фланец с гермопроходом для проводов термопар, способный выдержать давление в камере до 200 атм. Жгут термопарных

проводов распаян на унифицированный 32-контактный разъем для соединения с измерительно-вычислительным комплексом (ИВК) ударной трубы. Так как кабель, соединяющий «штангу» с ИВК выполнен медными проводами, на разъеме установлена дополнительная термопара «хромель-копель» для измерения «холодных» спаев всех термопар.

В среднем сечении ударной трубы дополнительно установлена термопара – «свидетель» из сплавов «хромель-копель», выступающая в поток на 20 мм. С помощью этой термопары измеряют температуру газа после удаления устройства.

Результаты, полученные при помощи данного устройства, представлены на рис. 4. Из рис. 4 видно, что имеет место существенно неравномерное распределение температур как по длине, так и по сечению канала. Также было отмечено, что в ожидаемых самых «горячих» сечениях (середина секции) температура не достигает наивысших значений, максимум распределения смещен к «промежуточным» сечениям. Это объясняется тем, что в именно в середине нагреваемой секции осуществляется подвод воздуха при наполнении трубы, привносящий дополнительную неоднородность в распределение температур.

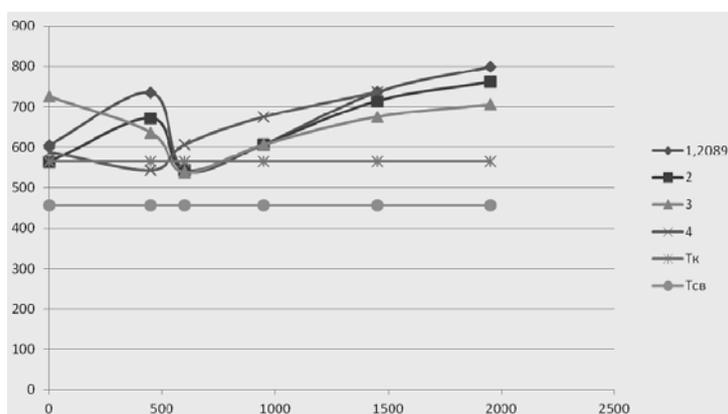


Рис. 4. Распределение поля температур в ударной трубе УТ-1М

На основании приведенных измерений подтвердилось предположение, что выявленная в [3, 4] неоднородность по времени температуры торможения потока во время пуска обусловлена неоднородностью распределения температуры воздуха в камере высокого давления перед пуском [2].

Результаты, полученные в ходе измерений полей температур в ударной трубе УТ-1М, позволили доказать необходимость создания нового метода и устройства для измерения параметров торможения (давления и температуры) в импульсных быстропотекающих процессах.

Авторами работы [5] был предложен новый метод измерения быстроменяющейся температуры торможения газового потока. Данный метод основан на предположении, что для рядом стоящих датчиков теплового потока значения α и T_0 в каждый момент времени одинаковы. Сами же датчики имеют разную температуру вследствие нагрева одного из них при помощи специального спирального нагревателя. Преимущество данного метода заключается в том, что он не зависит от чисел Маха и Рейнольдса и может быть использован при исследовании нестационарных тепловых потоков. Также в работе [5] была предложена модель датчика для измерения тепловых потоков, основанного на эффекте Зеебека, т.е. на возникновении ЭДС в электрической цепи, состоящей из последовательно соединённых разнородных проводников, контакты между которыми находятся при различных температурах. Температурный градиент обеспечивался за счет того, что на разной глубине датчик прогревается до разной

температуры. Однако описанный в [5] высокотехнологичный датчик теплового потока оказался крайне ненадежным, что не позволило использовать его в экспериментах.

В рамках работы по измерению параметров торможения в импульсных гиперзвуковых потоках сконструировано устройство (рис. 5) для непосредственного измерения параметров течения в импульсной гиперзвуковой аэродинамической установке УТ-1М ЦАГИ, имеющей характерную длительность эксперимента от 5 до 40 миллисекунд.

Устройство оснащено двумя пьезодатчиками давления [6] и двумя датчиками теплового потока (поверхностные термопары) [7]. Применение поверхностных термопар стало возможным ввиду того, что был разработан новый метод обработки их сигналов, позволивший снизить инерционность с 1 секунды до 1 миллисекунды. Разработанное устройство позволяет измерять не только средние за время эксперимента значения параметров торможения, но и их пульсационную составляющую, по крайней мере, в акустическом диапазоне частот. Теоретические исследования показывают, что именно пульсационная составляющая параметров течения существенно влияет на аэродинамику и теплообмен на поверхности гиперзвуковых летательных аппаратов, в частности, на условия ламинарно – турбулентного перехода.



Рис. 5. Устройство для измерения параметров торможения в импульсных гиперзвуковых потоках

Для повышения точности определения температуры торможения T_0 необходимо знать точные значения коэффициентов тепловой активности ε установленных на модели датчиков. Для этого была проведена их индивидуальная тарировка на импульсной тепловой градуировочной установке ИТГУ.

Тепловой градуировочный импульс установки создается струей нагретого воздуха 4 (рис. 6) из сопла 1, направленной перпендикулярно к активной поверхности преобразователя 3. Диаметр струи соизмерим с диаметром его активной поверхности. Струя нагретого воздуха 4, направленная на градуируемый преобразователь 3 до подачи теплового импульса отклоняется в сторону струей ненагретого воздуха 5 из сопла 2. При этом температура калориметра градуируемого преобразователя примерно равна комнатной. Для подачи импульса отклоняющаяся струя прерывается на некоторое время? и тогда струя нагретого воздуха направляется на калориметр.

Амплитуда плотности теплового потока измеряется. Отсечение струи холодного воздуха осуществляется с помощью отсечного клапана.

На рис. 7 показано разработанное устройство, установленное на ИТГУ для проведения тарировок. Примеры сигналов, зарегистрированных с помощью ИВК установки ИТГУ, показаны на рис. 8 и 9. Было определено, что коэффициенты тепловой активности ϵ обоих датчиков слабо зависят от начальной температуры и равняются $\epsilon=875$. Из рис. 8 и 9 видно, что сигнал «горячего» датчика, имевшего начальную температуру $t_n = 150$ °С меньше сигнала «холодного» датчика ($t_n = 20$ °С) примерно в 1,5 раза. Соответственно, так же различаются и тепловые потоки в оба датчика (рис. 10). Обработка результатов измерений по уравнению (1), проведенная на интервале времени от 0 до 40 мс (рис. 11), дала значение температуры потока ~ 300 °С, что соответствует показаниям контрольной термопары, установленной на ИТГУ.

$$T_0 \approx \frac{q_1 T_1 - q_2 T_2}{q_1 - q_2} ; \quad \alpha(\tau) = \frac{q_1(\tau) - q_2(\tau)}{T_1(\tau) - T_2(\tau)}, \quad (1)$$

где: T_0 – температура торможения;
 T_1 – температура первого датчика;
 T_2 – температура второго датчика;
 q_1 – тепловой поток в первый датчик;
 q_2 – тепловой поток во второй датчик.

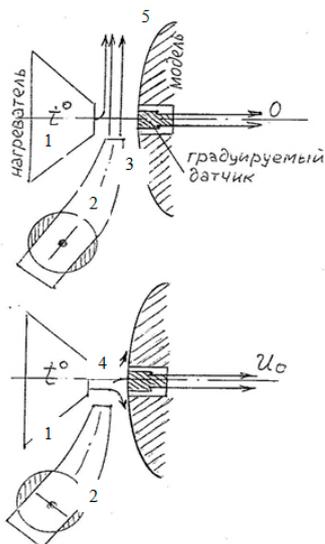


Рис. 6. Принцип действия установки ИТГУ



Рис. 7. Разработанное устройство на ИТГУ

Таким образом, можно сделать вывод, что разработанные метод и устройство позволяют измерять параметры торможения газовых потоков за интервалы времени, измеряемые несколькими миллисекундами при соизмеримых значениях температуры торможения и начальной температуры «горячего» датчика. Кроме того, указанное устройство может применяться и при измерениях высокочастотной пульсационной составляющей в аэродинамических трубах длительного действия, если его на короткое время вводить в поток с помощью быстродействующего механизма.

Также необходимо отметить, что в ходе тарировки были предложены меры по усовершенствованию как разработанного устройства, так и самой импульсной тепловой градуировочной установки ИТГУ.

Разработанное устройство было испытано на ударной аэродинамической трубе УТ-1М ЦАГИ при различных давлениях и числах Маха. Так, диапазон давлений составил от 30 до 80 атмосфер. Для изменения скорости потока использовались сменные гиперзвуковые сопла, которые позволили испытать устройство при числах Маха, равных 5, 6 и 8. В настоящее время проводится обработка результатов, полученных в ходе серии экспериментов на ударной трубе УТ-1М.

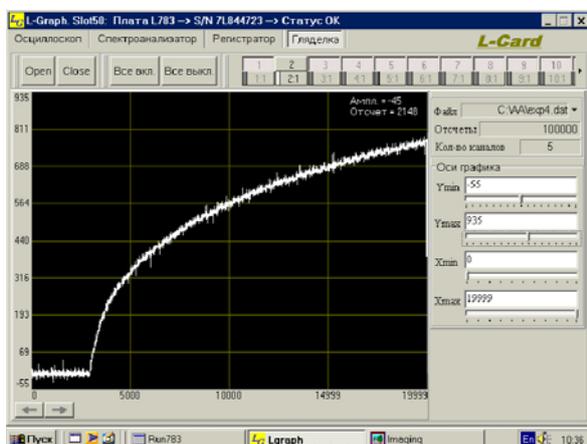


Рис. 8. Сигнал «холодного» датчика

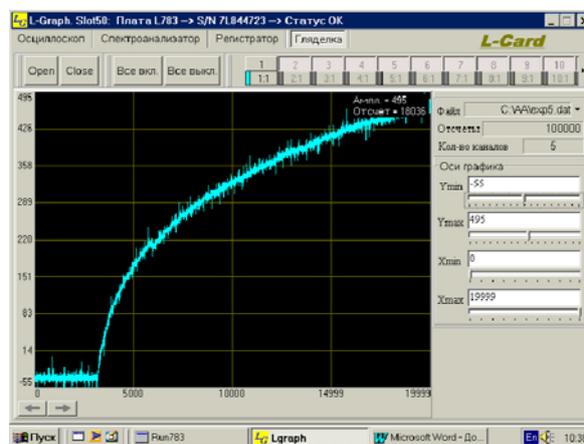


Рис. 9. Сигнал «горячего» датчика

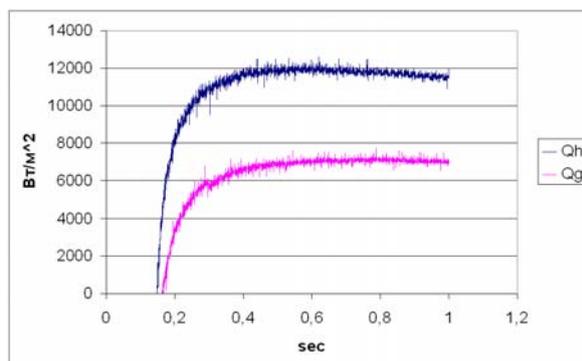


Рис. 10. Обработка сигналов датчиков в тепловых потоках

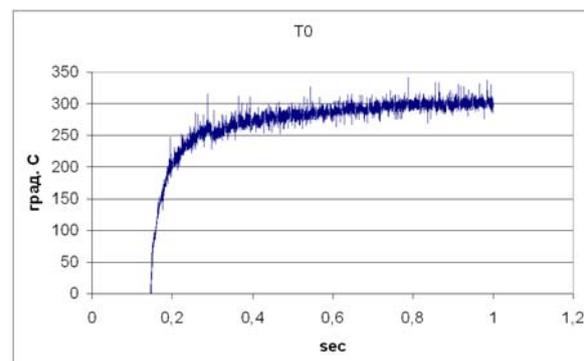


Рис. 11. Обработка сигналов датчиков в температурах

Литература

1. *А.Н. Иванов.* Параметры течения газа перед соплом ударной трубы УТ-1М в режиме импульсной трубы. - НТО НИО-8 ЦАГИ. - №10276, 2000г.
2. *Ю.В. Жилин, Н.И. Евсеев.* Разработка методики и средств для измерения концентрации твердой фазы в двухфазном потоке и параметров торможения потока. - НТО НИО-8 ЦАГИ. - №10693, 2003г.
3. *В.Н. Афанасьев, Э.С. Бирюков.* Студенческий научный вестник // «Измерение параметров торможения в гиперзвуковом высокоэнтальпийном потоке». Том X, часть 3, Москва 2010.
4. *Э.С. Бирюков* сб. тр. Всероссийской конференции молодых учёных и специалистов Будущее машиностроения России // «Тарировка модели для измерения параметров торможения в импульсных гиперзвуковых потоках». МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2010.

5. H. Knauss, U. Gaisbauer, A. Maslov, B. Smorodsky. International Conference on the Methods of Aerophysical Research // «Calibration Experiments of a New Active Fast Response Heat Flux Sensor to Measure Total Temperature Fluctuations», Novosibirsk Publishing House “Nonparel”, 2002. p.86-113.

6. Л.Г. Гвоздева, Ю.В. Жилин. Пьезоэлектрический датчик давления. – ПТЭ. - №, 1977.

7. В.Я. Боровой, Ю.Ю. Колочинский. Труды ЦАГИ // «Поверхностные термомпары – средство исследования теплообмена на моделях в аэродинамических трубах периодического действия». Выпуск 2340, Москва 1987.

УДК 621.91.01

НАЗНАЧЕНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКЕ ДИСКОВ ГТД С УЧЕТОМ ПОКРЫТИЙ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА¹

Михаил Сергеевич Ёлкин

*Студент 5 курса,
кафедра «Технология авиационных двигателей и общего машиностроения»,
Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П.А. Соловьева*

*Научный руководитель: Р.Н. Фоменко,
кандидат технических наук, ст. преподаватель кафедры «Технология авиационных
двигателей и общего машиностроения»,
Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П.А. Соловьева*

Обоснована актуальность назначения оптимальной скорости резания при механической обработке. Приведены результаты по обработке коррозионно-стойкой стали твердосплавным инструментом с различными наноструктурированными покрытиями. Показано, что при использовании покрытий с низким коэффициентом трения значение оптимальной скорости выше, чем при использовании инструмента без покрытия. Показана экономическая эффективность применения инструмента с наноструктурированным покрытием. Показано влияние режимов обработки и покрытий инструмента на его износ.

1. Введение

Создание авиационных двигателей нового поколения и других сложных механотронных систем невозможно без использования новых материалов, уменьшения веса конструкции с одновременным повышением мощности, коэффициента полезного действия, ресурса работы, надежности, уменьшением стоимости изделия и т. д. Таким образом, возрастает удельная нагрузка на единицу поверхности ответственных деталей, что приводит к необходимости исследования требуемых параметров качества поверхностного слоя детали, обеспечивающего наибольший срок службы изделия, а

¹ Работа выполнена при поддержке Фона содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, контракт № р/17017 и Совета по грантам Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых и научных школ, грант № МК-1702.2012.8

также к поиску технологических условий обработки, позволяющих выполнить заданные конструктором требования и сократить число доводочных и специальных операций.

Для обеспечения требуемых параметров качества поверхностного слоя детали используются специальные операции доводки поверхностей: полирование, электрохимическое шлифование, поверхностно-пластическая обработка: алмазное выглаживание, обдувка дробью и т. п. Однако, как показала многолетняя практика, в большинстве случаев требуемое значение шероховатости, остаточных напряжений и наклепа можно обеспечить путем подбора определенного соотношения технологических условий обработки, в первую очередь таких, как режимы резания и геометрия инструмента.

Известно, что для конкретной пары обрабатываемый – инструментальный материал при заданных условиях обработки существуют оптимальные режимы резания, при которых обеспечивается минимальный износ инструмента, а также наилучшие показатели параметров качества поверхностного слоя и эксплуатационные свойства детали (шероховатость, наклеп, остаточные напряжения, контактная жесткость и др.) после обработки. Одним из объяснений минимального размерного износа инструмента при оптимальной температуре резания является максимальное значение отношения твердости инструментального материала к твердости обрабатываемого.

По исследованиям профессора Силина С. С. оптимальным режимам резания соответствует оптимальная температура резания $T_{опт}$, которая является константой для каждой рассматриваемой пары инструментальный-обрабатываемый материал. Значение $T_{опт}$ достигается при определенной скорости резания v_0 . Таким образом, задача получения поверхности требуемого качества заключается в нахождении оптимальной скорости резания v_0 , которая обеспечит оптимальную температуру резания $T_{опт}$.

2. Постановка задачи

В настоящее время на производстве широко применяется режущий инструмент с износостойкими покрытиями, которые значительно повышают его эффективность. Как показали исследования, износостойкие покрытия инструмента благодаря низкому коэффициенту трения, обусловленному более слабыми силами адгезионного схватывания материала покрытия с обрабатываемым, существенно изменяют параметры процесса резания: уменьшают длину контакта стружки с поверхностями инструмента, силу резания, снижается температура резания и деформация срезаемого припуска вследствие повышения угла схода стружки. Покрытия изменяют процесс резания, а значит, и влияют на формирование тех или иных параметров качества поверхностного слоя детали.

Имеющаяся теоретико-экспериментальная база [1] позволяет без постановки опытов расчетным методом определять оптимальные режимы резания и различные параметры качества поверхностного слоя детали для инструментов без покрытия. Однако уже несколько десятилетий на производстве используются инструменты с износостойкими покрытиями, в том числе и наноструктурные покрытия 2D и 3D (superlattice), которые значительно повышают производительность обработки по сравнению с инструментами без покрытия. Отсутствие теоретико-экспериментальных зависимостей определения параметров качества поверхностного слоя для инструментов с покрытиями часто приводит к снижению эксплуатационных характеристик ответственных деталей и повышению трудоемкости их изготовления.

Переход от понимания качественного влияния покрытий на процесс резания к конкретным опытными данным является важным этапом в построении точной математической теории. Для подтверждения влияния износостойких покрытий на различные параметры процесса резания были проведены эксперименты по обработке точением со сменными пластинами с разными коэффициентами трения.

3. Экспериментальные исследования процесса резания инструментами с наноструктурированными покрытиями

Для установления оптимальной скорости резания v_0 инструментом с различными покрытиями была проведена серия экспериментов при следующих условиях. Обрабатываемый материал – коррозионно-стойкая сталь ЭК26 (05X12H2K3M2AФ). В качестве инструментов использовались сменные твердосплавные пластины ВК6 SNUN–120412, ГОСТ 3882–74. На сменные пластины ВК6 методом конденсации с ионной бомбардировкой наносились два вида композитных наноструктурированных покрытий: (Ti;Si)N и (Ti;Si;Al)N. Выбор сочетаний инструментальный материал – покрытие – обрабатываемый материал осуществлялся с точки зрения обеспечения наименьшей адгезии модифицированных поверхностей инструмента с обрабатываемым материалом.

Обработка производилась на универсальном токарно-винторезном станке НН 22. Составляющие силы резания P_z , P_y и P_x регистрировались универсальным динамометром УДМ–600, подключенным посредством 10-разрядного аналого-цифрового преобразователя к ПЭВМ. Это позволило существенно снизить погрешности измерения и упростить дальнейшую статистическую обработку результатов. Для определения температуры резания измерялась термо-ЭДС естественной термопары заготовка-резец, образующейся в процессе резания [2]. На рис. 1 представлена установка для проведения экспериментов.



Рис. 1. Станок с оборудованием для исследования процесса резания:

1 – динамометр УДМ – 600; 2 – пирометр; 3 – токосъёмник; 4 – инструментальный микроскоп; 5 – аналогово-цифровые преобразователи; 6 – ПЭВМ, с программным обеспечением, позволяющим регистрировать все сигналы от АЦП в одном диалоговом окне и сохранять их в формате *.csv

На рис. 2 приведен пример результатов эксперимента при обработке инструментом с покрытием и без покрытия. На основании полученных термо-силовых зависимостей процесса резания, с использованием расчетно-графического метода

профессора Силина С.С., были разработаны уравнения обрабатываемости, представленные в табл. 1. Уравнения обрабатываемости позволяют рассчитывать оптимальное значение скорости при различных технологических условиях обработки.

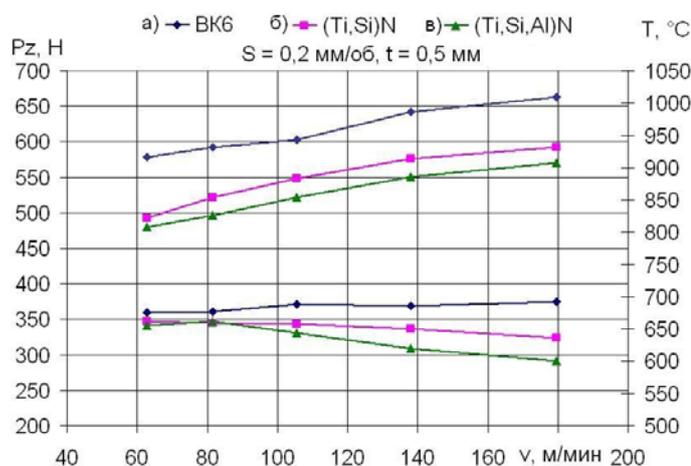


Рис. 2. Значение тангенциальной составляющей силы резания Pz и температуры в зоне резания: а – ВК6 без покрытия; б – ВК6 с покрытием (Ti,Si)N; в – ВК6 с покрытием (Ti,Si,Al)N

Табл. 1. Уравнения обрабатываемости коррозионно-стойкой стали ЭК26

ЭК26– ВК6Р	ЭК26–(Ti,Si)N–ВК6Р	ЭК26–(Ti,Si,Al)N–ВК6Р
$v_o = \frac{1,68a}{a_1} \left(\frac{s \cdot t \cdot c\rho}{t^{0,77} \cdot S^{0,083}} \right)^{2,5}$	$v_o = \frac{1,76a}{a_1} \left(\frac{s \cdot t \cdot c\rho}{t^{0,685} \cdot S^{0,106}} \right)^{2,47}$	$v_o = \frac{2,27a}{a_1} \left(\frac{s \cdot t \cdot c\rho}{t^{0,96} \cdot S^{0,0395}} \right)^2$

По результатам экспериментов определены значения оптимальных скоростей резания v_o инструмента с различными покрытиями (табл. 2). Адгезионная составляющая коэффициента трения f_M определялась на одношариковом адгезиометре по ГОСТ 16429-70 при температуре в зоне контакта $T=900$ °C, что в первом приближении соответствует условиям резания [3].

Табл. 2. Результаты расчета режимов резания на ЭВМ

Режущий инструмент	Оптимальная скорость резания v_o , м/с	Сила трения f_M
ВК6 (без покрытия)	80	0,4
ВК6+(Ti,Si)N	95	0,26
ВК6+(Ti,Si,Al)N	93	0,29
<i>Примечание:</i> подача $S = 0,14$ мм/об; глубина резания $t = 0,5$ мм		

Как видно из полученных значений, оптимальная скорость инструмента с покрытием выше, чем у инструмента без покрытия. Это связано с тем, что при резании сила трения у инструмента с покрытием ниже, в связи с этим для снятия припуска требуется меньшее количество механической энергии, а значит и количество выделившейся теплоты меньше. Так как при оптимальной температуре обработки T_{opt} наблюдается максимальное значение отношения твердости инструментального материала к твердости обрабатываемого, то для инструмента с покрытием, чтобы достичь этой T_{opt} требуется увеличить скорость резания на некоторое значение Δv ,

зависящее от силы адгезионного взаимодействия покрытия с обрабатываемым материалом.

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что чем меньше коэффициент трения f_M пары покрытие – обрабатываемый материал, тем больше будет оптимальная скорость резания v_0 .

В ходе экспериментов производились измерения размерного износа режущих пластин. По результатам измерений был построен график (рис. 4) зависимости износа пластин от пути резания. На рис. 3 представлены фотографии режущих кромок инструмента, сделанные посредством инструментального микроскопа через определенные промежутки времени.



Рис. 3. Фотографии передней кромки $VK6+(Ti;Si;Al)N$, слева направо: 135 м, 289 м 436 м

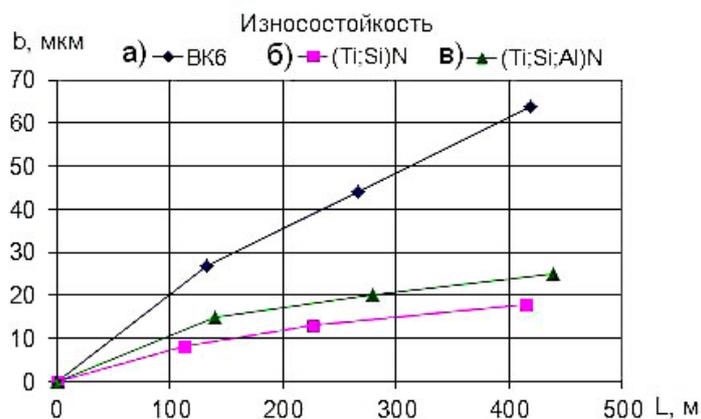


Рис. 4. График износа:

a – $VK6$ без покрытия; *б* – $VK6$ с покрытием $(Ti;Si)N$; *в* – $VK6$ с покрытием $(Ti;Si;Al)N$.
Обрабатываемый материал ЭК26 (05X12H2K3M2AФ), геометрия режущей пластины:
 $r=1,2$; $\gamma=8^\circ$; $\alpha=12^\circ$; $\varphi=\varphi_1=45^\circ$, режимы обработки $v=120$ м/мин; $S=0,14$ мм/об; $t=0,5$ мм.

Анализируя график износа режущих пластин, можно сделать вывод, что наименьшая интенсивность изнашивания зафиксирована при резании пластиной с покрытием $(Ti;Si)N$. Это объясняется более слабыми адгезионными процессами, происходящими на границе схода стружки по передней поверхности инструмента. За первые 100-150 м пройденного резцом пути скорость износа максимальна, при дальнейшей работе инструмента, скорость износа постепенно снижается. На рис. 3 отчетливо видно, что кромка $VK6+(Ti;Si;Al)N$ имеет примерно одинаковый рельеф износа передней поверхности, как при 135 м, так и 289 м пройденного пути.

4. Определение экономической эффективности использования инструмента с наноструктурированным покрытием

Покрытия режущего инструмента позволяют не только увеличить его стойкость, но и использовать более производительные режимы резания без снижения качества поверхностного слоя детали, который обеспечивает высокий ресурс и надежность

ответственной детали. Приведем пример расчета экономической эффективности использования инструмента с покрытиями по критерию минимальной себестоимости операции.

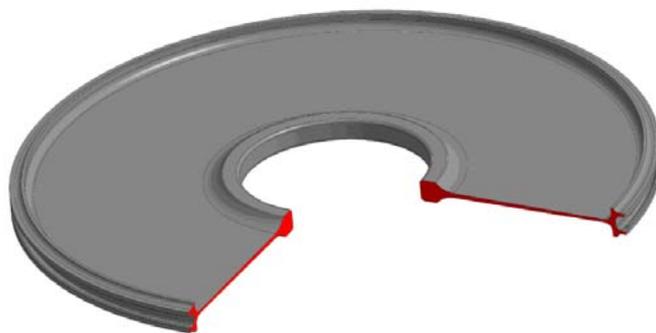


Рис. 5. Диск компрессора

Деталь представляет собой диск 9 ступени компрессора высокого давления газотурбинного двигателя пятого поколения GE90 (рис. 5). Конструкторский чертеж требует получения шероховатости поверхностно слоя полотна диска Ra 1,25 мкм, что достижимо при назначении оптимальной скорости резания v_0 .

Для расчета экономической себестоимости вариантов обработки необходимо произвести сравнительный анализ рассматриваемых вариантов с позиций технологической себестоимости, которую целесообразно определять по формуле 1. Данная методика поэлементного расчета реализована в программном обеспечении [3, 4] и позволяет достаточно точно определить технологическую себестоимость обработки.

$$C_{tex} = B_c \cdot t_m + B_c \frac{t_{cm} \cdot t_m}{T} + \Gamma_u \cdot t_m, \quad (1)$$

где B_c – полная себестоимость одной минуты работы станка и станочника без затрат на режущий инструмент; руб/ст-мин;

t_m – машинное время обработки, мин;

t_{cm} – время смены затупившегося инструмента, мин;

Γ_u – затраты, обусловленные эксплуатацией режущего инструмента за период его стойкости между переточками, руб./период;

T – период стойкости инструмента, мин.

Табл. 3. Результаты расчета экономической эффективности инструмента

Инструмент	t_m , мин.	T , мин.	Γ_u , руб./мин.	C_{tex} , руб.
ВК6Р	35	10	36	1590
(Ti,Si)N	29	20	21	880
(Ti,Si,Al)N	30	20	21	890

Таким образом, экономическая эффективность от использования режущего инструмента с композитным наноструктурированным покрытием (Ti,Si)N – **710** руб./дет.; (Ti,Si,Al)N – **700** руб./дет.

Литература

1. Инженерия поверхности деталей [Текст]: под общ. ред. А. Г. Сулова. – М.: Машиностроение. – 2008. – 320 с.
2. *Безъязычный В.Ф.* Экспресс-метод тарирования термодпар [Текст] / В. Ф. Безъязычный, М. В. Тимофеев, Р. Н. Фоменко // Справочник. Инженерный журнал. 2010. – № 7. – С. 38–42.
3. *Шустер, Л.Ш.* Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел [Текст] Л. Ш. Шустер. – Уфа: Гилем, 1999. – 199 с.
4. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2011613369 «Расчетное определение оптимальных режимов резания при точении инструментами с наноструктурированными покрытиями» / Безъязычный В. Ф. (RU), Сутягин А. Н. (RU), Фоменко Р. Н. (RU) // Заявка №2011611697, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29.04.2011.
5. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2011613671 «Оценка экономической эффективности применения инструмента с наноструктурированными покрытиями на основе расчета технологической себестоимости операции механической обработки» / Безъязычный В. Ф. (RU), Сутягин А. Н. (RU), Фоменко Р. Н. (RU) // Заявка №2011611821, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11.05.2011.

УДК 621.01

ФОРМИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННЫХ СТРУКТУР В ПРОСТРАНСТВЕ МЕХАНОСБОРОЧНОГО КОМПЛЕКСА

Эдуард Валерьевич Харитонов

Студент 6 курса,

кафедра «Технологии машиностроения»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Г.Н. Мельников,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии машиностроения»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Машиностроение – главная отрасль народного хозяйства, определяющая возможность и рамки развития других отраслей. Большая часть предприятий машиностроительного комплекса относится к серийному типу производства. При этом ряд организаций были вынуждены сократить объемы выпуска и перешли из массового и крупносерийного в среднесерийное, сохраняя по сей день потребность в коренной реконструкции производства.

В машиностроительной отрасли ведущих стран в связи с широким распространением международной и внутриотраслевой специализации стала не редкой ситуация, при которой более 70 % комплектующих приходят на сборку по кооперации с других специализированных предприятий. При этом предприятия-поставщики относятся, как правило, к серийному типу производства. На предметно- и подетально-специализированных заводах-поставщиках при выполнении нового заказа технологическое оборудование может переставляться (расходы на эту процедуру низки при бесфундаментной установке оборудования), а разбивка изделий на группы, обеспечивающая поточность производства, – корректироваться.

Технологическое оборудование представляется в следующих целях. Пространственная компонента структуры технологической системы, задаваемая расположением станков, и отражающая группирование изделий, определяет характеристики материальных потоков. С организацией последних связано от 10% до 60% затрат на изготовление конечного изделия. Очевидно, что для снижения общей суммы затрат необходимо улучшать структуру производства, в том числе перемещением оборудования и перегруппированием изделий, иными словами, организовывать технологически-ориентированные структуры оборудования. При этом объективно существует потребность в разработке и совершенствовании научно-методических основ подобного рода реструктуризации.

Таким образом, вопросы, затрагивающие структуру технологических систем серийного производства в машиностроении, ее анализ и синтез, возможности ее совершенствования, представляют большой научный интерес. Поэтому можно сформулировать цель исследований.

Цель: Повышение эффективности проектных решений при технологической подготовке производства, разработке проектов технологического перевооружения, а также при проектировании новых цехов серийного производства.

Объект исследования: Структура и компоновочно-планировочные решения технологических систем серийного производства.

Предмет исследования: Процесс синтеза функционально-пространственной структуры механообрабатывающих цехов серийного производства.

На основе поставленной цели можем выявить задачи исследования:

1. Анализ основных подходы при формировании компоновочных и планировочных решений серийного производства;
2. Анализ существующих методик синтеза и моделей технологической системы производства и их недостатки;
3. Анализ метода функционального и пространственного структурирования технологической системы производства на основе анализа взаимосвязей оборудования.

Современное механосборочное производство представляет собой сложную динамическую систему. Процесс его проектирования, согласно [2], включает в себя четыре последовательно выполняемых этапа: структурно-функциональный, алгоритмический, параметрический и планировочный. В случае масштабности проектной задачи процесс синтеза окончательного результата может включать в себя несколько циклов с различной детализацией данных и уровнем принимаемых решений, каждый из которых будет содержать в себе все указанные этапы. Например, в случае проектирования цеха, таких цикла – два: результатом первого служит компоновка цеха, второго – планировки участков.

Суть структурно-функционального этапа заключается в синтезе структурной модели, которая отражает состав, тип и взаимосвязь элементов, и функциональной модели, учитывающей свойства элементов и системы, необходимые для выполнения ими своего служебного назначения. При проектировании технологической системы производственного подразделения на этом этапе выполняется: формирование совокупности технологических процессов, закладываемых в основу процесса проектирования, определение технологического оборудования, выбор состава участков, выбор состава и количества станков по участкам и т.д.

Алгоритмический этап проектирования включает в себя составление алгоритмической модели, содержащей взаимные связи между элементами и системами

в процессе производства. На данном этапе проектирования выполняется выбор дисциплины обслуживания заготовок, составление расписаний для подтверждения достаточности рассчитанного количества оборудования (при необходимости).

На параметрическом этапе проектирования производится определение количественных значений взаимосвязей между отдельными физическими параметрами элементов системы. Параметрические модели представляют собой уравнения материально-энергетического баланса в различных проявлениях. На данном этапе рассчитываются характеристики потоков: материальных, энергетических, информационных. На основе этих расчётов определяется состав и количество вспомогательного оборудования и обслуживающих систем, накладываются требования на инфраструктуру производства.

На окончательном, планировочном этапе решается задача размерных связей между отдельными элементами системы. Результатом этапа служит планировочное решение участков.

Следует отметить, что каждый этап синтеза технологической системы производства можно разделить на множество подэтапов, обладающих собственными ограничениями. Вследствие этого сам процесс проектирования можно осуществить двумя принципиально различными путями:

- а) с введением в процесс обратных связей, позволяющих вернуться на предыдущий этап в случае непрохождения ограничений;
- б) с разбиением этапов на множество проектных задач, выстраиваемых затем по порядку, уменьшающему или исключаящему необходимость возврата.

У рассматриваемых технологических систем серийного производства существует ряд особенностей, не присущих единичному и массовому производству. Речь идёт о необходимости структуризации совокупности технологических процессов изготовления изделий, входящих в программу выпуска. Структуризация такого рода позволяет повысить организационный уровень прочих составляющих технологической системы и понизить время, связанное с переходами от изготовления одного вида изделия к изготовлению другого.

Процесс структуризации совокупности технологических процессов называется унификацией. В ходе унификации осуществляется переход от множества единичных ТП к меньшему множеству унифицированных ТП.

Работы по унификации технологических процессов получили развитие в рамках трёх методов (представлены в хронологической последовательности):

1. Метод типизации технологических процессов, разработанный и научно обоснованный доктором техн. наук А.П. Соколовским в 1930 г. [3];
2. Метод групповой обработки деталей, разработанный и научно обоснованный доктором техн. наук С.П. Митрофановым [3];
3. Метод обработки деталей с применением модульной технологии, разработанный доктором техн. наук Б.М. Базровым [4].

Для эффективного использования унифицированных технологических процессов в производствах серийного типа в соответствующие проектные решения должны быть заложены необходимые производственные условия. Такие условия в большой мере определяются правильно выбранной формой специализации производства.

В машиностроении четко определились три формы специализации предприятий и производственных подразделений [2]:

1. Технологическая, при которой в подразделении сосредотачивается изготовление изделий или заготовок, имеющих специфическую общность выполняемых технологических процессов или операций.

2. Предметная, при которой в подразделении сосредотачивается изготовление и сборка изделий или сборочных единиц, имеющих признаки конструктивно-технологической общности.

3. Поддетальная, при которой в подразделении изготавливаются детали, имеющие, как правило, признаки конструктивно-технологической или только технологической общности.

Следует отметить, что если ранжировать технологическую, предметную и поддетальную формы специализации интегрально по технико-экономическим критериям (производительности труда, использованию оборудования, связыванию оборотных средств и приведённых затрат на годовой выпуск), то их соотношение составит 1:1,5:1,9 [2].

Таким образом, при проектировании машиностроительных предприятий серийного типа производства следует в первую очередь отдать предпочтение поддетальной форме специализации участков.

Как указывалось ранее, все методики проектирования технологических систем серийного производства, представляющие интерес, в качестве исходных данных используют унифицированные ТП. Из рассмотренных в разделе 2.1 трёх методов наиболее применимым является метод групповой обработки деталей с применением групповой технологии. Большой интерес также представляет использование модульной технологии, но, к сожалению, в настоящее время методическая основа проектирования производства на её основе недостаточно проработана.

Наиболее распространённые методики синтеза технологических систем производственных подразделений, опирающиеся на групповую технологию, используют классификацию и кодирование деталей (изделий) [2, 3]. Рассмотрим общее содержание таких методик.

В первую очередь для каждой детали формируется информационная структура, содержащая информацию (состав определяется технологом) по конструктивным и эксплуатационным характеристикам детали, по технологическому процессу её изготовления. Эта информация может быть закодирована на основе таблиц кодов (например [2]) и представлена в виде строки. В настоящее время в связи с развитостью вычислительной техники и программного обеспечения этап кодирования может не производиться. После классификации выполняется группирование деталей (для каждой методики свой механизм группирования) производится разработка унифицированных технологических процессов, расчёт на их основе станкоёмкостей групп, определение количества и состава оборудования по участкам. При необходимости (если расчётная загруженность оборудования получается низкой) возможен возврат на этап группирования деталей.

В настоящее время среди методик синтеза технологических систем производства, использующих классификацию и кодирование деталей, наиболее развиты три подхода:

- а) на основе ранжирования критериев;
- б) на основе комплексного аддитивного критерия;
- в) на основе использования нейронных сетей.

Рассмотрим их поподробнее на примере трёх методик.

Методика синтеза технологических систем производства, на основе классификации и кодирования деталей с использованием ранжирования критериев.

В качестве моделей методика [3] использует табличное представление данных и аналитические зависимости. Алгоритм её применения следующий:

1. Первичная классификация совокупности n наименований деталей D и их предварительное группирование.

Выбор значимых признаков (характеристик), по которым будет производиться группирование. Т.е. каждая деталь d_i виде комплекса k признаков:
$$d_i = \{P_1, P_2, \dots, P_j, \dots, P_k\}_i.$$

Каждый признак представляется двумя частями: $P_{ji} = \{X_j, x_{ji}\}$, здесь X_j – наименование признака, x_{ji} – его значение.

Расстановка признаков (характеристик) в порядке убывания весомости, или определение подчинённости (выполняется экспертами-технологами). А так же формирование структуры классификационного шифра вида: $K = \{X_1, X_2, \dots, X_k\}$, в котором признаки выстроены в порядке подчинённости.

Создание правил кодирования $F = \{F_1, F_2, \dots, F_k\}$ для каждого признака (характеристики), переводящих множество деталей D в множество кодов Q : $Q = F(D)$. Определение значений признаков (характеристик) и кодирование каждой детали. Т.е. для любой детали $Q_i = \{q_1, q_2, \dots, q_j, \dots, q_k\}_i$.

Сортировка списка кодов деталей по возрастанию (либо по значениям характеристик, если кодирование не применяется). $Q \rightarrow Q'$, так что $\forall q \in Q', \forall i = \overline{1, n-1}, \forall j = \overline{1, k} : q_{ji} \leq q_{j(i+1)}$. Анализ и разделение списка кодов деталей Q' , а затем множества деталей D на l групп по признаку X_f (преимущественно конструктивному, определяется экспертом).

$$Q' \rightarrow Y, Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_a, \dots, Y_l\}, Y_a \subseteq Q', \forall Q_i \subset Y_a : \overline{B_i, B_{i+1}},$$

где B_i, B_{i+1} – граничные значения кода признака X_f (определяются экспертом).

$$Y: D \rightarrow G$$

В цикле:

1.1 Техничко-экономическая оценка эффективности решения по значению среднего коэффициента загрузки K_z оборудования и прироста экономической эффективности ΔC .

$$\Delta C = \Delta C_{шт} + \Delta C_u + \Delta C_m,$$

где $\Delta C_{шт}$ – изменения в себестоимости обработки деталей вследствие изменения штучного времени, руб.;

ΔC_u – изменения в себестоимости наладки станка в результате изменения $t_{н.з.}$, руб.;

ΔC_m – изменения в затратах на технологическую подготовку производства, отнесённое к плановому периоду вследствие изменения трудоёмкости проектирования, разработки ТП и изготовления оснастки, руб.

1.2. Корректировка групп выбором других значений B или другой характеристики X_f .

1.3. Переработка унифицированных технологических процессов.

К недостаткам данного подхода относятся:

- низкая эффективность системы кодирования вследствие её высокой субъективности;
- высокая трудоёмкость, поскольку проверка загруженности оборудования производится после разработки унифицированных технологических процессов;
- принцип ранжирования критериев в приложении к группированию деталей неадекватен, поскольку различные признаки (характеристики) могут быть сравнимы по влиянию на схожесть деталей, и могут оказывать различное влияние для двух разных пар деталей;
- неприменимость для проектирования мелкосерийного производства вследствие яркого проявления ранее указанных недостатков;
- невозможность расчёта приростов экономической эффективности при проектировании нового производства вследствие отсутствия исходных данных.

Методика синтеза технологических систем производства, на основе классификации и кодирования деталей с использованием комплексного аддитивного критерия.

В качестве моделей данная методика [2], как и предыдущая, использует табличное представление данных и ряд аналитических зависимостей. В качестве исходных данных кроме конструктивных и технологических характеристик каждой детали используется также маршрутный технологический процесс её изготовления с указанием суммарного штучно-калькуляционного времени. Выбор того или иного технологического процесса находится в компетенции эксперта.

Алгоритм использования методики следующий:

1. Выбор k значимых признаков (характеристик), по которым будет производиться группирование. Каждая деталь $d_i \in D$ представляется в виде комплекса k признаков: $d_i = \{P_1, P_2, \dots, P_j, \dots, P_k\}_i$.

Каждый признак представляется двумя частями: $P_{ji} = \{X_j, x_{ji}\}$, здесь X_j – наименование признака, x_{ji} – его значение. В состав признаков должны входить: конструктивная сложность, состав оборудования, используемого для изготовления детали.

2. Расстановка признаков (характеристик) в порядке убывания весомости, или определение подчинённости (выполняется экспертами-технологами). А так же формирование структуры классификационного шифра вида: $X = \{X_1, X_2, \dots, X_k\}$, в котором признаки выстроены в порядке подчинённости.

3. Создание правил кодирования $F = \{F_1, F_2, \dots, F_k\}$ для каждого признака (характеристики), переводящих множество деталей D во множество кодов Q .

4. Определение значений признаков (характеристик) и кодирование каждой детали. Т.е. для любой детали $Q_i = \{q_1, q_2, \dots, q_j, \dots, q_k\}_i$.

5. Сортировка списка деталей по возрастанию кодов (либо по значениям характеристик, если кодирование не применяется). $Q \rightarrow Q'$, так что

$$\forall q \in Q', \forall i = \overline{1, n-1}, \forall j = \overline{1, k} : q_{ji} \leq q_{j(i+1)}$$
$$Q \rightarrow D'$$

В силу ограниченности количества признаков классификации на данном этапе возможно слияние различных деталей с одинаковым значением полных кодов в небольшие группы.

6. Объединение деталей в группы (выполняется несколько вариантов).

Выбор детали d_0 в качестве базовой по критериям максимума конструктивной сложности и максимума количества наименований оборудования, используемого для изготовления детали.

Расчёт меры близости z для каждой детали с базовой на основе кодов. Формирование множества Z :

$$\forall d_i \in D': z_i = 1 / (1 + \alpha \cdot R^2(d_0, d_i)),$$

где α – коэффициент пропорциональности, $R(d_0, d_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^k (q_{ji} - q_{j0})^2}$ – функция расчета расстояния в евклидовом пространстве признаков (рис. 1).

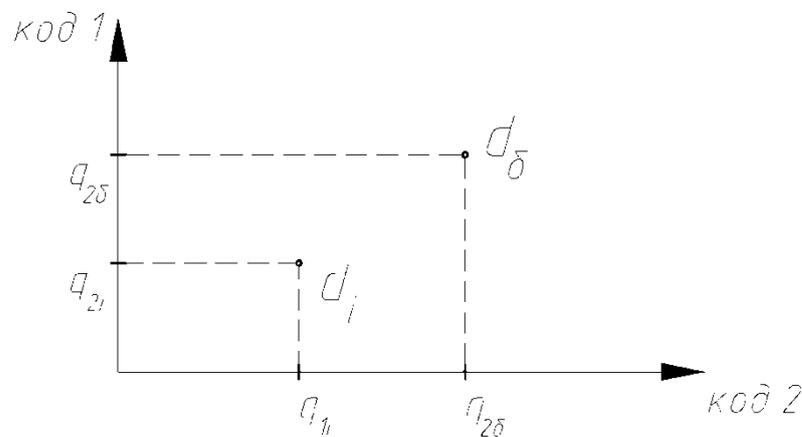


Рис. 1. Частное представление деталей d_0 и d_i в евклидовом пространстве признаков

Ранжирование деталей по убыванию меры близости. $Z \rightarrow Z'$, так что $\forall z \in Z', \forall i = \overline{1, n-1}: z_i \leq z_{i+1}$ $Z' \rightarrow D''$

Определение состава первой большой группы так, чтобы количество технологического оборудования на участке изготовления этой группы лежало в пределах c_{\min}, c_{\max} , а его загруженность была максимальной.

$$g = (d_1, \dots, d_l), \text{ так, что } C_n = \left[\sum_{i=1}^l t_{u-k}(d_i) \right], C_n = \overline{c_{\min}, c_{\max}}$$

$$G' = G + g; G = G'$$

Исключение рассмотренных на предыдущем этапе групп из общего списка. $D''' = D'' - g; D'' = D'''$

Пересчёт меры близости делением на значение меры для первой по списку оставшейся детали, принятие этой детали в качестве базовой.

$$\forall z \in Z', \forall i = \overline{1, n}: w = z_i / z_0, z_i = w$$

Возврат до исчерпания списка групп деталей.

1. Выбор наилучшего варианта объединения групп.
2. Разработка унифицированных технологических процессов.

К недостаткам данного подхода относятся:

- низкая эффективность системы кодирования вследствие её высокой субъективности;
- низкая адекватность расчётов меры близости на основе кодов;
- неверный подход к пересчёту меры близости после выделения первой и последующих крупных групп, поскольку для оставшихся в списке групп мера должна пересчитываться заново, на основе значений их признаков (характеристик);
- отсутствие обратной связи между окончательными унифицированными технологическими процессами и составами участков.

Методика синтеза технологических систем производства, на основе классификации деталей с использованием нейронных сетей.

В качестве моделей методика использует представление пространств решений в виде нейронных сетей и аналитические зависимости для интерпретации входящих и выходящих данных. Алгоритм её применения следующий:

1. Расчёт размеров сети Розенблатта [5] (количества узлов) в зависимости от количества признаков классификации X и количества групп деталей l . Количество групп и диапазоны характеристик деталей, определяющих состав групп, задаются на основании существующего производства аналогичного проектируемому.

2. Обучение нейронной сети [5] на основе сложившихся групп деталей на аналогичном предприятии. Т.е. представление функции Y в виде состояния сети таким образом, что:

$$G_{\text{аналог}} = Y(D_{\text{аналог}}),$$

$D_{\text{аналог}}$ и $G_{\text{аналог}}$ – множество деталей и групп деталей, соответственно, использованных для обучения.

3. Для каждой детали:

3.1. Подача значений признаков (характеристик) i -ой детали на входы нейронной сети.

$$\forall j = \overline{1, k} : In_j = x_j(d_i),$$

где k – количество признаков и входов нейронной сети; In_j – значение на j -ом входе сети Розенблатта; $x_j(d_i)$ – значение j -ого признака i -ой детали.

3.2. Получение результатов с выходов нейронной сети в виде вероятностей отношения детали к той или иной группе. Принятие решения – к какой группе отнести деталь.

$$\forall a = \overline{1, l} : p_a(d_i) = Out_a,$$

где $p_a(d_i)$ – вероятность отношения i -ой детали к a -ой группе; Out_a – значение на a -ом выходе сети Розенблатта.

$$\forall a = \overline{1, l} : b = \max(p_a(d_i)),$$

где b – номер группы, к которой отнесена деталь.

При необходимости – дополнительное обучение нейронной сети (рис. 2).

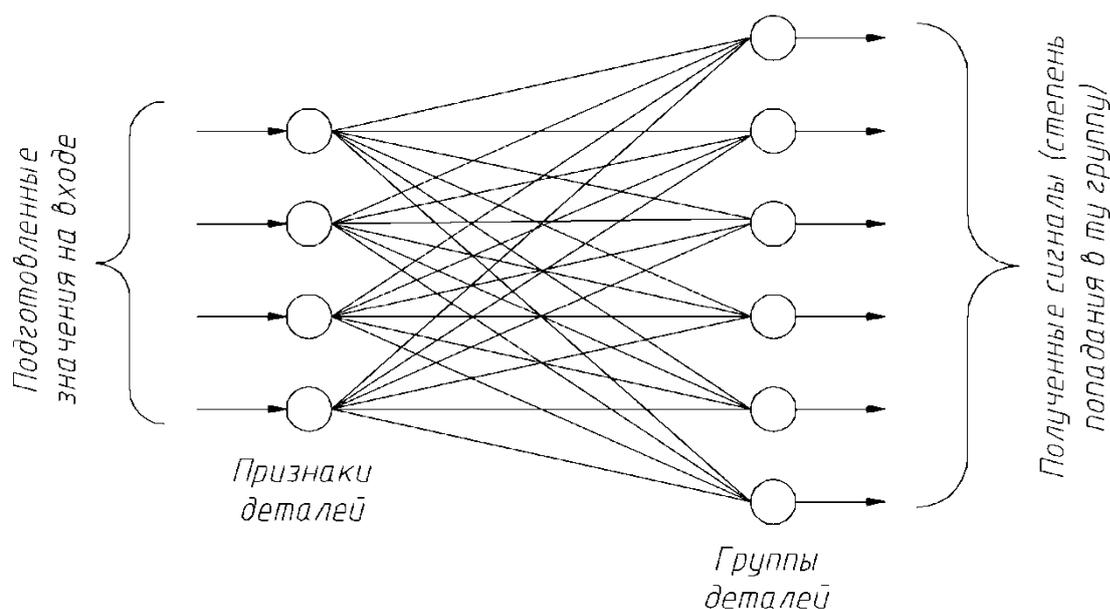


Рис. 2. Пример нейронной сети классификации деталей, ее обучение

4. Для каждой полученной группы деталей:

4.1. Формирование нейронной сети Хопфилда (относящейся к типу сетей с обратными связями) с двумя типами узлов. Узлы первого типа соответствуют вариантам технологических операций R^* , при помощи которых можно реализовать технологические процессы изготовления деталей группы. Узлы второго типа соответствуют моделям технологического оборудования C^* , на которых эта реализация возможна.

4.2. Представление целевой функции в виде функции Ляпунова [5], уменьшающейся в ходе работы сети (подобный подход позволяет исключить этап её обучения). Функция имеет вид:

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{ij(i \neq j)} W_{ij} \cdot Out_i \cdot Out_j - \sum_i In_i \cdot Out_i + \sum_i \tau_i \cdot Out_i$$

где W_{ij} – весовой коэффициент связи между i -ым и j -ым нейронами; In_i и Out_i – соответственно входной и выходной сигналы i -го нейрона; τ_i – порог i -го нейрона; $W_{ij} = 0$ и $W_{ij} = W_{ji} \forall i, j$.

4.3. Расчёт весов и порогов сети, определение необходимых значений входных параметров.

4.4. После запуска расчётов и достижения сетью устойчивого состояния (завершение процесса оптимизации) – считывание состояния нейронов и их интерпретация в качестве решения, содержащего перечень применяемых технологических операций и моделей используемого технологического оборудования сети.

4.5. Формирование унифицированного технологического процесса группы и расчёт количества технологического оборудования по моделям с использованием полученного решения.

4.6. Переход к следующей группе деталей.

К недостаткам данного подхода относится:

- обучение на примерах технологических процессов действующих производств с большой вероятностью обуславливает низкое качество группирования,

особенно в случае проектирования нового предприятия со структурой выпускаемой продукции, отличающейся от эталонной;

- обучение на существующих примерах ограничивает качество группирования уровнем примеров;
- группирование производится без учёта загруженности оборудования;
- большое время расчёта для большеразмерных задач.

Кроме того, при развитии рассмотренных методик была затронута ещё одна задача – оптимизация размещения оборудования, в упрощённом виде представляемая квадратичной задачей о назначениях. Суть этой задачи в необходимости размещения n станков на n площадках с критерием минимума суммы длин путей, совершаемых заготовками в пространстве цеха.

Вследствие отсутствия до конца 80-х методов оптимизации, позволяющих решить поставленную задачу в общем случае, её решение производилось для небольших ($8 \div 10$ станков) участков точными методами либо прямым перебором. К тому же этот вопрос чаще рассматривался в рамках оптимизации ГПЛ на основе групповой технологии [7], а не как часть проанализированных методик. При этом обратная связь получаемых результатов с предыдущими задачами: группирования деталей, определения состава оборудования по участкам – не учитывалась.

В третью методику, самую современную из рассмотренных, включён этап решения задачи размещения оборудования [6]. Но только в рамках квадратичной задачи о назначениях и без обратной связи по отношению к ранее решаемым задачам, что позволяет рассматривать этот этап как полностью самостоятельный. Его основой является метод оптимизации с использованием нейронных сетей, аналогичным применяемым для задачи выбора перечня применяемых технологических операций и моделей используемого технологического оборудования сети.

Таким образом, все три рассмотренных ранее методических подхода обладают одним существенным недостатком: при проектировании с их использованием не учитываются взаимосвязи между пространственной и временной структурой технологической системы (влияние плана расположения оборудования на группирование деталей). Кроме того, такие методики сложны в формализации и требуют соучастия человека в процессе проектирования (зависимость от опыта человека).

Все три рассмотренных подхода относятся к детали-ориентированным, т.е. построение технологической системы начинается с анализа конструктивно-технологической общности деталей. В начале 80-х был предложен подход ориентированный на разделение в первую очередь технологического оборудования на участки, а затем – группирование деталей. Подход получил общее название: кластеризация станков с использованием меры близости. Данная методика опирается на табличное представление данных о структуре участка и использует ряд математических зависимостей в ходе оптимизации.

К недостаткам данного подхода относятся:

- отсутствует обратная связь между разработкой унифицированных технологических процессов, составом и загруженностью технологического оборудования;
- группирование производится без учёта загруженности оборудования и характеристик заготовок;
- решение задачи размещения оборудования и учёт его влияния на получаемые решения не выполняется в рамках данного подхода.

Кроме того, вне рамок рассмотренных подходов были разработаны методики решения задачи группирования деталей и определения состава оборудования на участках посредством представления проектируемых объектов в виде графов, аналитических зависимостей и матриц. Оптимизация структуры технологической системы производства в них производилась при помощи математического программирования. Вследствие большой вычислительной сложности задачи при её решении методами математического программирования эти методики не получили практического развития и не были положены в основу методик проектирования машиностроительного производства.

Выводы:

1. В связи с интенсивным развитием рынка машиностроительной продукции растёт доля производств серийного типа, что свидетельствует об актуальности проблемы повышения их эффективности.

2. Существующие методики проектирования цехов серийного производства базируются, в основном, на классификации деталей и анализе станкочемкости по видам оборудования (работ), вследствие чего недостаточно учитывают технологические взаимосвязи в процессе изготовления и сложно формализуемы для оптимизации проектных решений.

3. Проектной предпосылкой повышения эффективности механообрабатывающего производства должна служить поддетальная специализация участков и цехов, обеспечивающая наилучшие условия для использования групповой или модульной технологии.

4. Поддетальная специализация участков в серийном производстве может быть обеспечена формированием технологически ориентированных структур оборудования в пространстве цеха.

5. Отсутствует методика структуризации и проектирования цехов серийного производства, основанная на формировании технологически ориентированных структур оборудования в пространстве цеха.

6. Отсутствует комплексная модель технологической системы производства и методика на её основе, позволяющая получать окончательный план расположения технологического оборудования на основе исходных технологических процессов изготовления деталей (изделий).

Анализ метода функционального и пространственного структурирования технологической системы производства на основе анализа взаимосвязей оборудования.

Рассмотрим комплексную модель и методику синтеза оптимальных компоновочно-планировочных решений цехов с учетом влияния основных факторов: мощности грузопотока (кратчайший путь перемещения заготовок и полуфабрикатов), рациональное использование площади участка, а также последовательности маршрута обработки.

1) Предварительно необходимо задаться исходными, которые могут характеризовать взаимосвязь оборудования:

- чертежи рассматриваемых деталей с габаритами и массой;
- маршрутные технологические процессы (ТП), несколько вариантов для каждой рассматриваемой детали;
- типоразмеры станков для каждой операции;
- перечень существующего оборудования;
- формы и габариты участка с расположением разного рода конструкций;
- точки подачи заготовок и выдачи готовых деталей.

Далее из всего ряда технологических процессов, для каждой детали, необходимо выбрать оптимальный ТП – с использованием наименьшего количества оборудования, также необходимо помнить про обеспечение загрузки станков.

2) Необходимо сформировать таблицу (матрицу) «станок-деталь», содержащую информацию, выбранную ранее (табл. 1).

Табл. 1. Пример матрицы «деталь-станок»

Деталь \ Станок	1	2	3	4	5
1	10	0	0	15	0
2	0	5	2	0	0
3	10	0	0	15	0
4	0	5	2	0	100

Все технологическое оборудование размещается в линию (рис. 3). Далее необходимо рассчитать критерий минимальной мощности грузопотока:

$$M_{yc\Sigma} = \sum_{i=1}^N (m_i \cdot l_i) \rightarrow \min, \text{ где } m_i - \text{масса } i\text{-ой детали};$$

l_i – путь, который проходит деталь i -го типа;

N – количество наименований деталей.

При оптимизации по приведенной схеме происходит «стягивание» оборудования, т.е. выделяются группы деталей и «кластеры» станков (табл. 2).

Табл. 2. Пример матрицы после оптимизации

Деталь \ Станок	1	2	3	4	5
1	10	15	0	0	0
3	10	15	0	0	0
2	0	0	5	2	0
4	0	0	5	2	100

Оптимизация линейной последовательности размещения оборудования ведется без учета последовательности маршрута обработки детали при помощи генетического алгоритма.

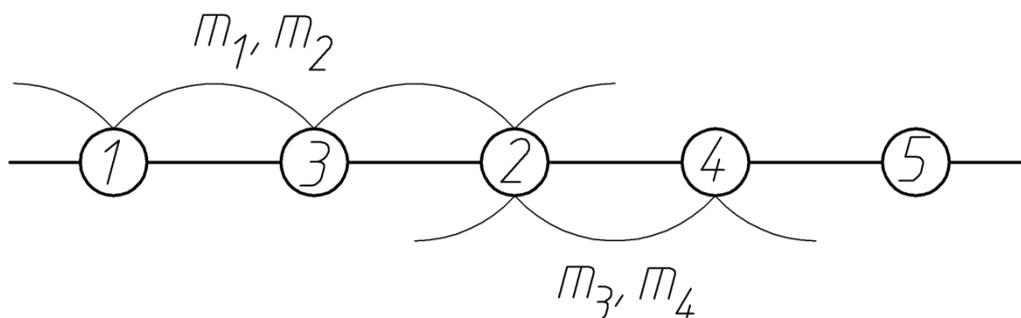


Рис. 3. Пример размещения оборудования в линию после оптимизации

На данном этапе можно выделить определенные технологические процессы изготовления деталей, не позволяющих использовать более производительное оборудование, для доработки.

3) Рассмотрим расчет оптимального количества рядов оборудования и количества станков в ряде. Необходимо учитывать тип размещения оборудования (рис. 4):

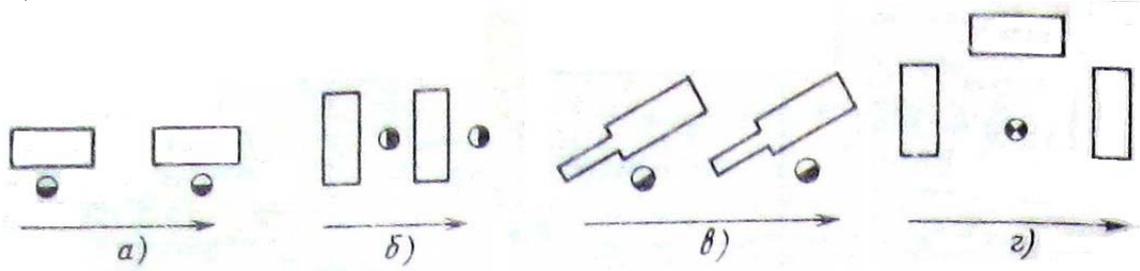


Рис. 4. Варианты размещения станков относительно транспортных средств:
 а – продольное; б – поперечное; в – угловое; г – кольцевое.

В случае размещения станков вдоль проезда

Определяем количество рядов на ширине участка: $n_B = \left\lfloor \frac{B_{уч}}{b_{ум}^{cp}} \right\rfloor$, где

$B_{уч}$ – ширина участка;

$b_{ум}^{cp}$ – среднее значение ширины инверсного темплета.

Далее определяем ширину инверсного темплета: $b'_{ум} = \frac{B_{уч}}{n_B}$, чтобы полностью

заполнить участок. Так как $b'_{ум}$ изменилась, то и длина инверсного темплета

изменится: $l'_{ум} = \frac{b_{ум}^{cp} \cdot l_{ум}^{cp}}{b'_{ум}}$. Далее можем определить оптимальное число оборудования

в ряде: $n_L = \left\lfloor \frac{L_{уч}}{l'_{ум}} \right\rfloor$.

В случае размещения станков поперек проезду расчет проводится аналогично:

$$n_L \rightarrow l_{ум}^{cp} \rightarrow l'_{ум} \rightarrow b'_{ум} \rightarrow n_B$$

В случае размещения станков под углом к проезду при расчете необходимо

учесть угол поворота оборудования (α): $n'_L = \frac{\cos \alpha}{b_{ум}^{cp}} \cdot (B_{уч} - l_{ум}^{cp} \cdot \sin \alpha - b_{ум}^{cp} \cdot \cos \alpha)$

$$n_L = \left\lfloor n'_L \right\rfloor - \text{если } \alpha > 45^\circ$$

$$n_L = \left\lfloor n'_L \right\rfloor - \text{если } \alpha \leq 45^\circ$$

$$n_B = \left\lfloor \frac{L_{уч}}{n_L} \right\rfloor$$

4) Проводится произвольная укладка полученной ранее линейной последовательности на треугольной сетке. Далее оптимизируется расположение

оборудования, для чего используется критерий максимума локальной мощности грузопотока: $M_{лок\Sigma} \rightarrow \max$. Локальная мощность грузопотоков определяется по правилу: если для каждой детали станки располагаются рядом, то к значению $M_{лок\Sigma}$ добавляется соответствующее значение грузопотока, остальные связи не учитываются. В итоге получаем решение с минимальной потребностью в межоперационном транспорте. На данном уровне оптимизации последовательность обработки деталей также не учитывается.

5) На данном этапе проводится учет последовательности обработки детали, а также расположение зон подачи заготовок и выдачи готовых деталей. Получаем решение на прямоугольной сетке путем деформации треугольной (рис. 5). Учет последовательности обработки детали проводится при помощи построения матриц «деталь-операция» (табл. 3).

Табл. 3. Пример матрицы «деталь-операция»

Операция Деталь	1	2	3	4	5
1	10	7	15	23	25
3	2	6	13	20	16
2	5	8	18	14	24
4	9	4	19	21	17
5	1	3	12	22	11

В ячейках указываются номера станков, т.е. фактически задается маршрут движения деталей по станкам.

Оптимизация решений проводится с учетом зон подачи заготовок и выдачи готовых деталей. Критерием оптимизации является минимум мощности грузопотока:

$$M_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^{W_i} (\Delta X_{ij} + \Delta Y_{ij}) \cdot m_i \rightarrow \min, \text{ где}$$

N – количество i -ых деталей;

W_i – количество операций для i -ой детали;

ΔX_{ij} – длина пути вдоль оси X i -ой детали от станка, на котором выполнялась j -ая операция до станка с операцией $j+1$;

ΔY_{ij} – длина пути вдоль оси Y i -ой детали от станка, на котором выполнялась j -ая операция до станка с операцией $j+1$;

При $j=0$ рассматривается отрезок пути от точки подачи заготовок, а при $j=W_i$ учитывается отрезок до точки выдачи готовых деталей.

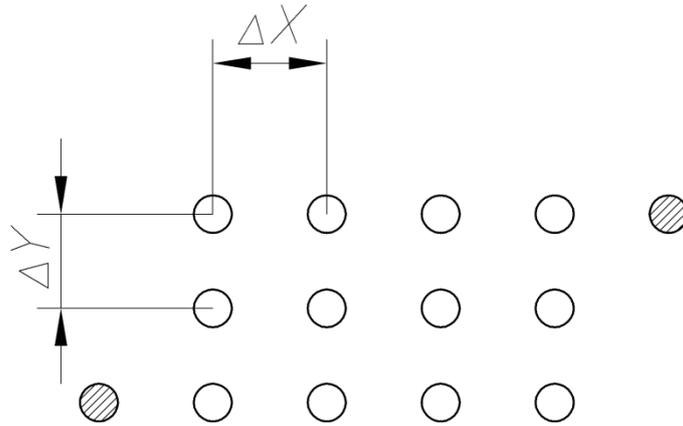


Рис. 5. Пример размещения оборудования в прямоугольной сетке

б) Проводится определение конкретных моделей оборудования по заданному типу, диапазону обрабатываемых размеров и диапазону точности. Для выбранного оборудования рассматриваются инверсные темплеты и формируется план размещения оборудования. Для каждого инверсного темплета определяется характерная точка (центр, место загрузки, рабочая зона), которая определяет размер окружности для разработки модели цифрового производства (рис. 6).

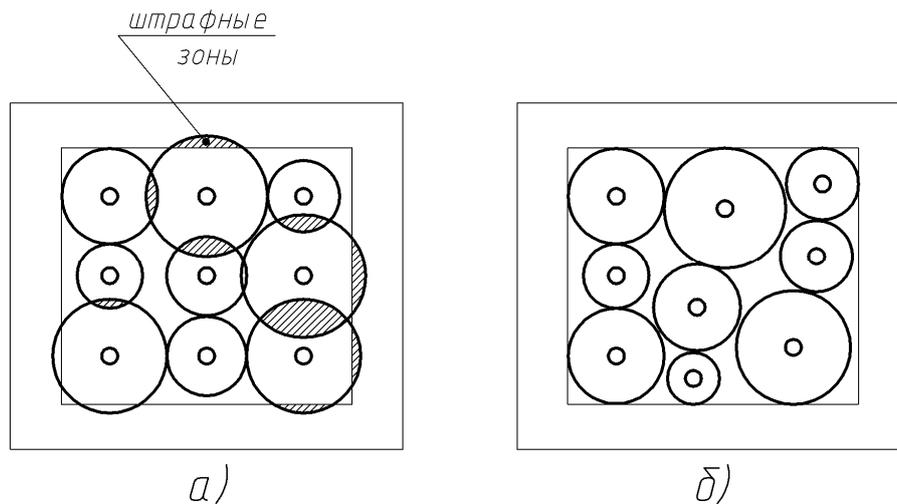


Рис. 6. Модель цифрового пространства (а) и ее оптимизация (б)

Критерием оптимизации здесь служит минимизация штрафных площадей (перекрытия окружностей):

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{S_{штр.i}}{S_{полн.i}} \right) \rightarrow \min \text{ – не учитывает площадь станка;}$$

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{S_{ст.i} \cdot S_{штр.i}}{S_{окр.i}^2} \right) \rightarrow \min \text{ – площадь станка учитывается.}$$

Далее происходит оптимизация по углу поворота с критерием минимума грузопотока, т.е. с учетом мест загрузки заготовок и выдачи готовых деталей на рабочих местах, с использованием их инверсных темплетов.

7) Окончательно проводится доводка технологической планировки. Для этого определяются размеры партий, размеры накопителей, необходимое количество грузоподъемных и транспортных средств, загруженности станков и производительность системы в целом.

Выводы.

1. Рассмотренная комплексная модель и методика синтеза оптимальных компоновочно-планировочных решений цехов позволяет одновременно решать задачи выявления технологически однородных групп изделий и размещения оборудования для их изготовления в пространстве цеха с использованием вычислительной техники.

2. Использование минимума мощности грузопотока в качестве критерия оптимизации планировочных решений и применение генетических алгоритмов можно обеспечить в пространстве цеха концентрацию оборудования для производства технологически однородных изделий.

3. Рассмотрен новый метод анализа технологических взаимосвязей оборудования для формирования состава участков и закрепления за ними изготавливаемых групп деталей, основанный на оптимизации линейной последовательности размещения станков по минимуму условной мощности грузопотока.

4. Для моделирования размещения оборудования при решении задачи синтеза планировочных решений цеха целесообразно использовать сначала треугольную решетку, без учета последовательности выполнения операций, а затем – прямоугольную, с учетом данной последовательности.

5. Использование предложенной методики оптимизации компоновочно-планировочных решений при создании цехов с поддетальной специализацией участков обеспечивает возможность более широкого применения групповой обработки и значительное сокращение длительности производственного цикла изготовления изделий.

6. Использование программного обеспечения, основанного на рассмотренной модели и методике, позволит сократить трудоемкость технологического проектирования, а также качественно повысить уровень принимаемых решений.

Литература

1. *Лобуз В.В.* Формирование технологически ориентированных структур оборудования в пространстве цеха: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. // В.В. Лобуз – 2008, 170 с.

2. *Мельников Г.Н.* Проектирование механосборочных цехов: **Учебник** для студентов машиностроительных специальностей вузов // Г.Н. Мельников, В.П. Вороненко; ред. А.М. Дальский. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.

3. *Митрофанов С.П.* Научная организация машиностроительного производства // С.П. Митрофанов. – 2-е изд., доп. и перераб. – Л.: Машиностроение, 1976.- 712 с.

4. *Базров Б.М.* Модульная технология в машиностроении // Б.М. Базров. – М.: Машиностроение, 2001. – 368 с.

5. *Иванова М.В.* Нейросетевой метод оптимизации планировок технологического оборудования в машиностроении: дисс. канд. техн. наук: 05.02.08: защищена 13.12.00./ Иванова Марина Валерьевна. – Уфа, 2000. – 240 с. – Библиогр.: - С.232–238.

Секция №4
Метрология и взаимозаменяемость

УДК 004.67

МИКРОКОНТРОЛЛЕРНАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНОГО БИЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ДЕТАЛИ

Рахим Суфьянович Нахушев

*Студент 4 курса,
кафедра «Специальная робототехника и мехатроника»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: А.М. Ростовцев,
старший преподаватель кафедры «Метрология и взаимозаменяемость»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Лабораторная работа №17 по курсу ТИКП и АС предназначена для построения АЧХ радиального биения вала на базе визуального отсчета данных. Лабораторный стенд состоит из токарного станка, с установленной в трехкулачковом патроне деталью цилиндрической формы, радиальное биение которой и предстоит измерить, индуктивной отсчетно-измерительной системы, датчик которой расположен в суппорте станка. Сигнал с датчика передается на отсчетно-измерительный блок, где преобразуется в отклонение стрелки отсчетного микроамперметра. Разность между максимальным и минимальным отклонениями, измеренными на различных частотах вращения, служит мерой действительного радиального биения. Динамическая погрешность определяется как разность действительного значения полученного при механическом вращении патрона и при ручном его вращении. Так как отклоняющая система отсчетного микроамперметра обладает существенной инертностью, это приводит к существенной не линейности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), что вносит большой вклад в погрешность измерения и практически сводит к нулю достоверность полученных данных, особенно на больших частотах вращения.

Для устранения этого явления использован высокопроизводительный микроконтроллер (МК) семейства AVR Atmega8 фирмы ATMEL. Микроконтроллеры AVR это семейство 8-и битных RISC микроконтроллеров с производительностью 20 млн. операций в секунду.

Выбор именно этого микроконтроллера обусловлен наличием в его архитектуре аналого-цифрового преобразователя (АЦП) кроме того микроконтроллер питается безопасным электрическим напряжением постоянного тока в диапазоне от 3 до 6 В.

Микроконтроллер выполняет следующие функции:

- преобразует аналоговый сигнал в цифровой
- сохраняет данные в оперативной памяти
- высчитывает экстремальные их значения
- усредняет полученные значения
- выводит на дисплей

Блок схема алгоритма представлена на рис. 1. Порты устанавливаются в состояние выход для подключения к ним семисегментных индикаторов. В блоке инициализации АЦП устанавливается частота 1000 выборок в секунду и прерывание по завершению преобразования. В цикле производятся АЦП преобразования и данные сохраняются в памяти МК. Число итераций равно произведению выборок за оборот и количества оборотов. Далее методом перебора ищутся экстремальные их значения. Происходит усреднение и расчет радиального биения. Информация выводится на дисплей. Вывод происходит постоянно до появления новой информации.

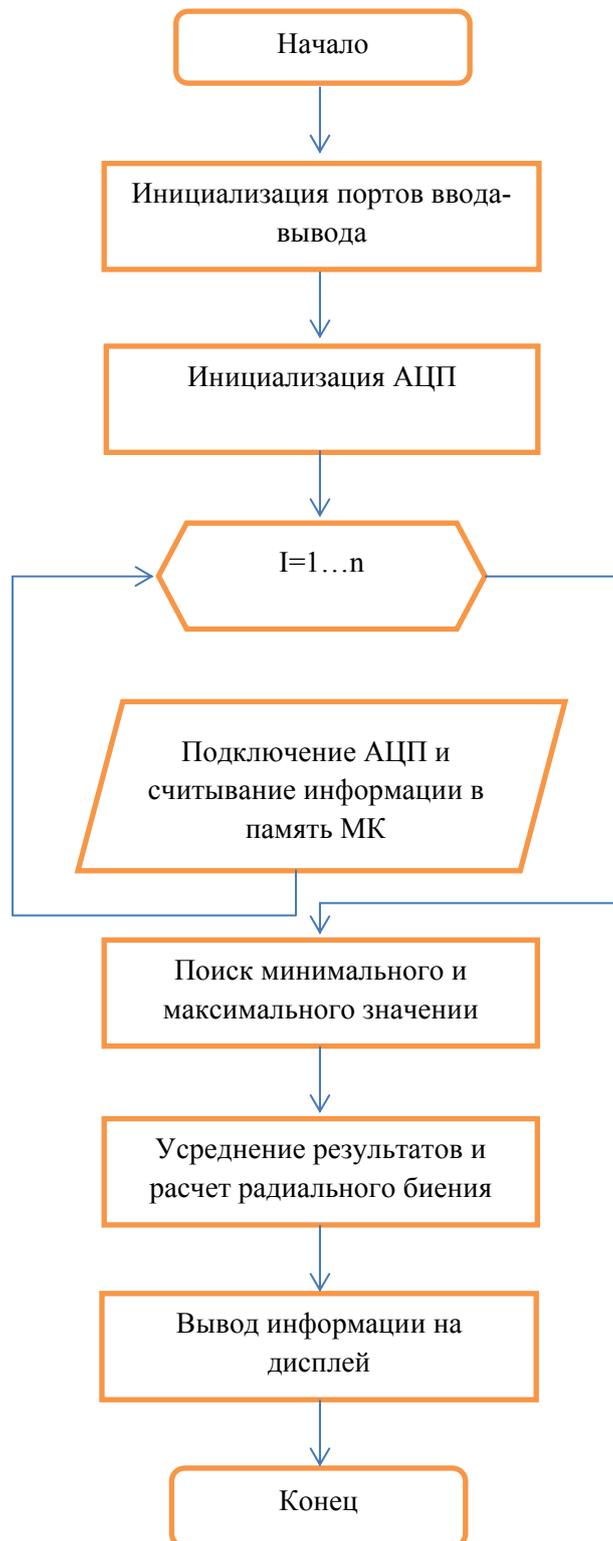


Рис. 1. Блок схема алгоритма

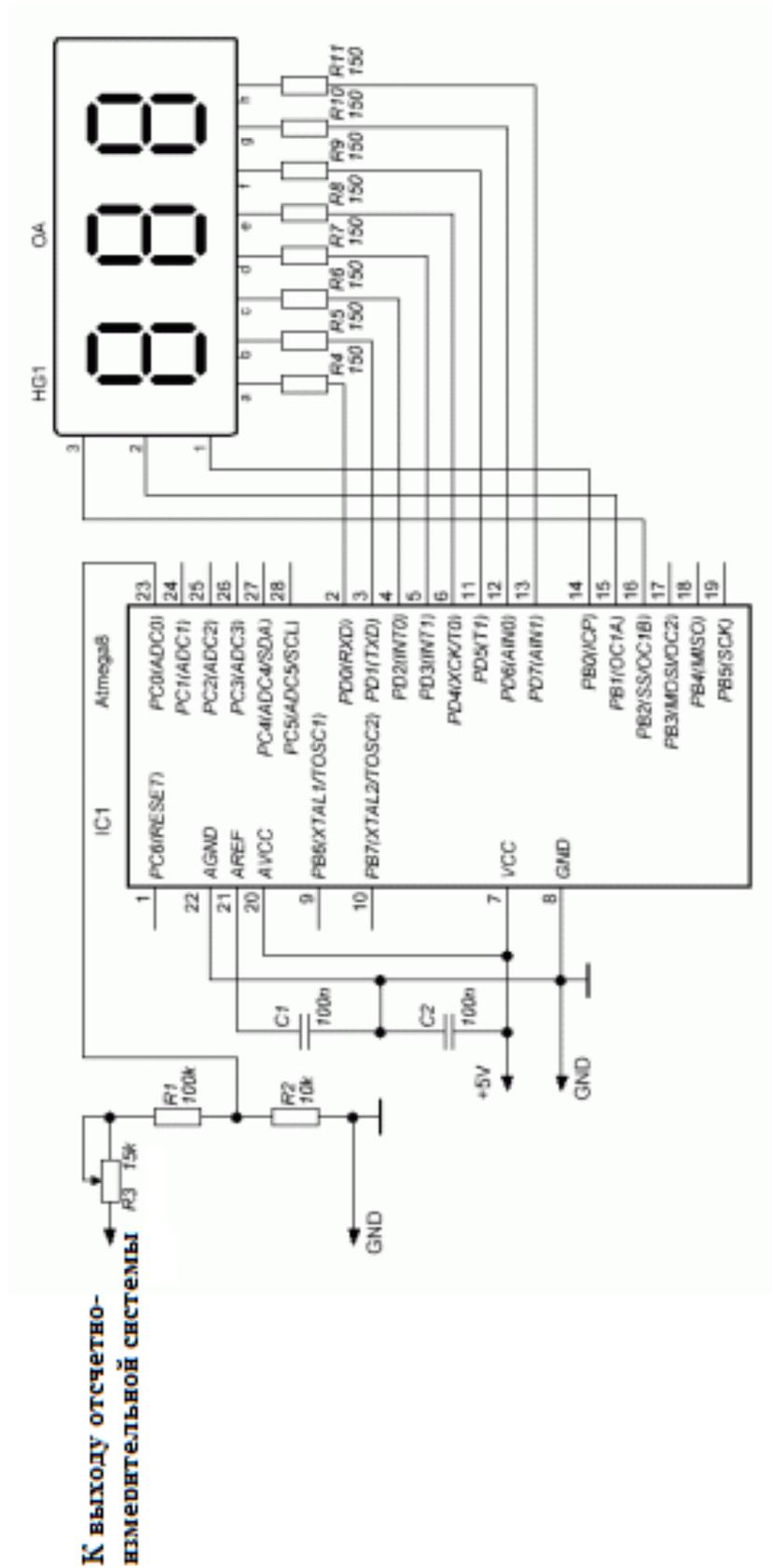


Рис.2. Принципиальная схема микроконтроллерного блока обработки данных

На рис. 2 показана принципиальная схема микроконтроллерного блока обработки данных. Принцип работы: с выхода индуктивной отсчетно-измерительной системы двухполярный аналоговый сигнал поступает на цепочку резистивного делителя, где преобразуется в однополярный. Резисторы R2, R3 устанавливают рабочую точку АЦП на уровне половины питания. Это позволяет исследовать сигналы с амплитудой ± 2.5 В. С делителя сигнал поступает на вход микроконтроллера задействованного как вход аналогово-цифрового преобразователя. В качестве опорного напряжения используется внутренний источник опорного напряжения (ИОН) 2,56 В, т.к. выход A_{ref} микроконтроллера соединен с ИОН, для обеспечения стабильности ИОН к выводу A_{ref} подключен конденсатор. После преобразования и обработки данные отображаются на трехразрядном семисегментном индикаторе с общим анодом. Применена динамическая индикация, что позволяет сэкономить ножки микроконтроллера.

Выводы

1. Отпала необходимость в визуальном отсчете по шкале выходного микроамперметра отсчетно-измерительного блока системы.
2. Существенно расширен диапазон частот вращения измеряемой детали.
3. Выявлено, что АЧХ практически не зависит от частоты вращения детали.
4. Созданы объективные предпосылки для дальнейшего совершенствования лабораторной работы с помощью персонального компьютера.
5. Данная разработка может быть положена в основу микроконтроллерной обработки сигнала при контроле параметров шероховатости поверхности.

УДК 620.19

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФЕКТА НАПЫЛЕНИЯ ХРОМА НА СТЕКЛЕ С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩЕЙ ТУННЕЛЬНОЙ МИКРОСКОПИИ

Антони Борисович Сырицкий

Студент 4 курса,

кафедра «Метрология и взаимозаменяемость»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.С. Комшин,

кандидат технических наук, ассистент кафедры «Метрология и взаимозаменяемость»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) - один из мощных современных методов исследования морфологии и локальных свойств поверхности твердого тела с высоким пространственным разрешением. За последние 10 лет сканирующая зондовая микроскопия превратилась из экзотической методики, доступной лишь ограниченному числу исследовательских групп, в широко распространенный и успешно применяемый инструмент для исследования свойств поверхности и измерения топографии. В данной работе будут освещены результаты исследований на сканирующем туннельном микроскопе.

Перед началом исследований была поставлена задача проанализировать возможности сканирующего зондового микроскопа НТК «Умка-02Е» в области обнаружения и изучения дефектов на поверхности проводящих материалов. Предметом исследования был выбран образец напыления хрома на подложку из стекла. Измерение топографии поверхности проводилось по методу постоянного тока с помощью кутанного платино-иридиевого зонда. Метод постоянного тока предполагает поддержание в процессе сканирования постоянной величины туннельного тока с помощью системы обратной связи. При этом вертикальное смещение сканера (сигнал обратной связи) отражает рельеф поверхности. По сравнению со вторым возможным методом, а именно методом постоянной высоты, использованный метод обеспечивает лучшее воспроизведение поверхности, вследствие чего и был выбран для проведения измерений. Добавим, что при сканировании поверхности использовались следующие параметры:

- Размер скана 0,995x0,995 мкм
- Разрешение скана 512x512 точек
- Параметры туннельного тока $U_{\text{tun}} = 0,27 \text{ В}$ $I_{\text{tun}} = 0,2 \text{ нА}$

Полученный результат приведен на рис. 1.

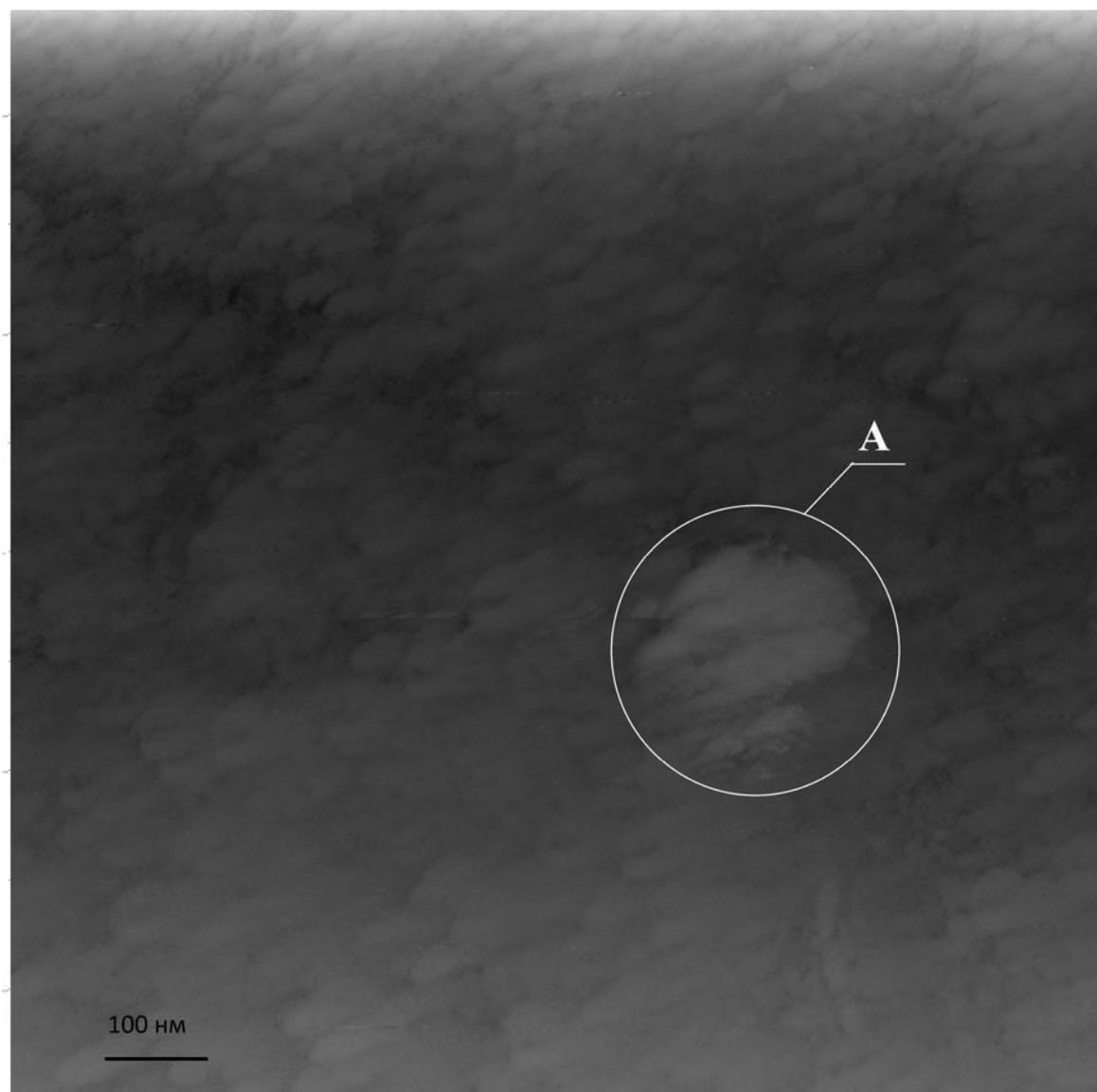


Рис.1. Полученный скан. А – Область с предполагаемым дефектом

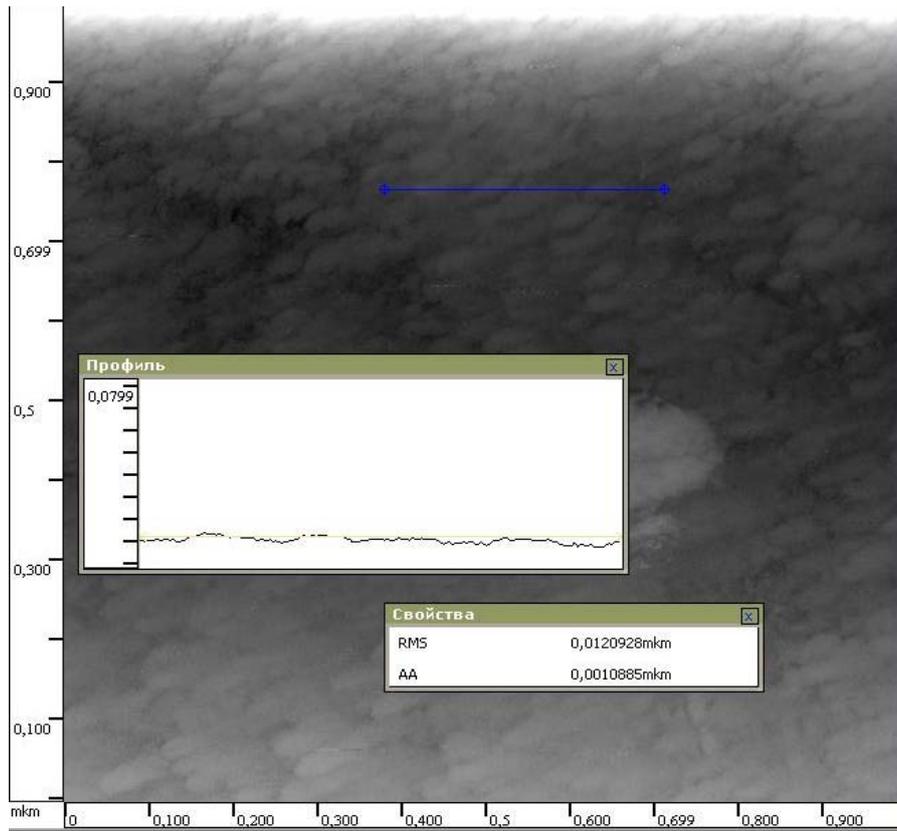


Рис. 2. Измерение профиля поверхности в бездефектной зоне

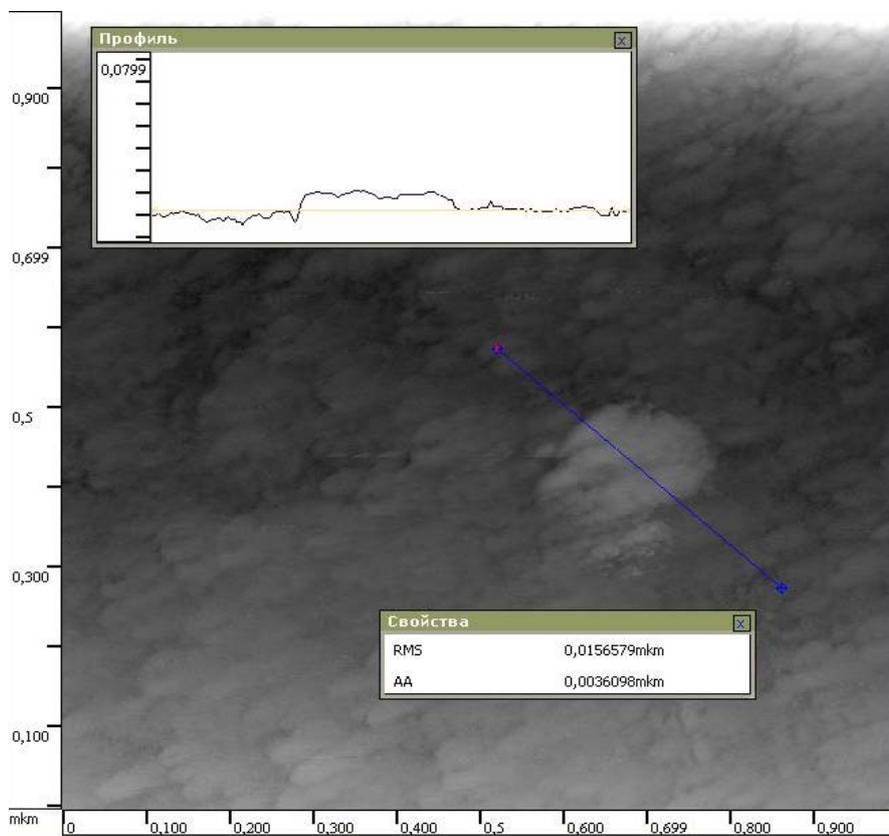


Рис. 3. Измерение профиля поверхности в зоне дефекта

На полученном изображении поверхности можно отметить область А, выделяющуюся своим рельефом на фоне остальной поверхности. Было предположено, что это поверхностный микродефект напыления. Для подтверждения этого были проведены исследования с помощью стандартных инструментов программного обеспечения микроскопа. Результаты приведены на рис. 2 и 3.

На рис. 2 видны результаты измерения профиля поверхности в зоне без дефектов, а на рис. 3 в зоне дефекта. На рис. 3 в центре профилограммы видно резкое изменение профиля поверхности, указывающее на наличие дефекта в этом месте. Это доказывает предположение о том, что рассматриваемый участок поверхности является микродефектом. С помощью стандартных инструментов программного обеспечения можно измерить ряд параметров топографии поверхности, связанных с наличием дефекта. Например: среднеквадратичное действующее значение профиля поверхности, измеренного вне зоны дефекта составляет $\approx 0,012$ мкм, а среднеквадратичное действующее значение профиля поверхности, включающей в себя зону дефекта составляет $\approx 0,016$ мкм.

В зависимости от области применения данной поверхности необходимо оценить годность участка с данным дефектом. Главными показателями при этом являются длина, ширина, высота и площадь дефекта. Данные параметры также могут быть измерены с помощью стандартных инструментов программного обеспечения микроскопа (рис. 4). При этом форму дефекта можно аппроксимировать двумя фигурами: прямоугольником и эллипсом – в зависимости от формы микронеровности. Для рассматриваемого дефекта была выбрана для аппроксимации форма эллипса и получены следующие результаты: ширина микродефекта по оси Y=213,45 нм, длина по оси X=146,64 нм, высота по оси Z ≈ 10 нм, площадь поверхности, ограниченной аппроксимирующим эллипсом = $0,09833$ мкм².

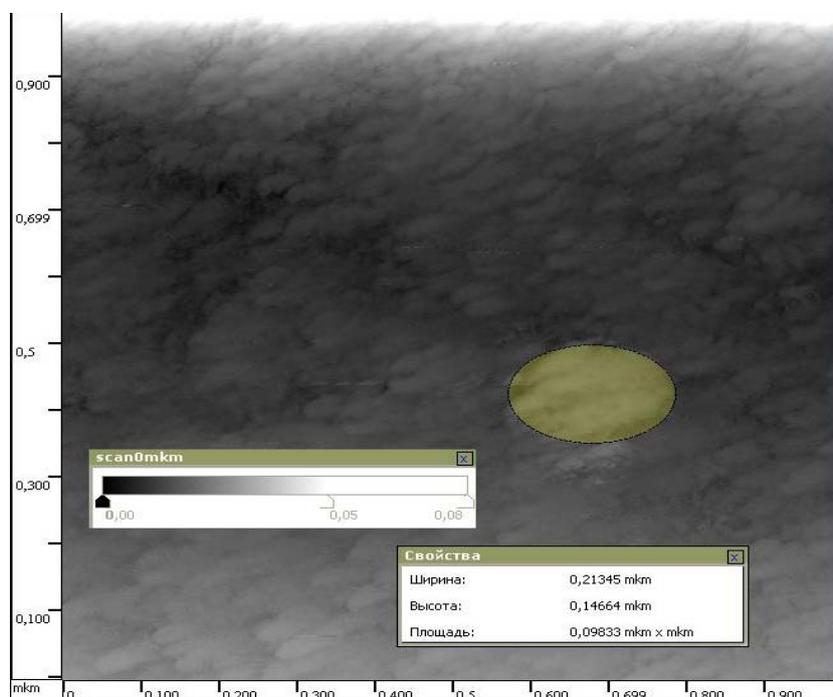


Рис. 4. Измерение площади дефекта

Также для оценки свойств топографии поверхности микродефекта предлагается использовать 3D визуализацию его поверхности. Программное обеспечение сканирующего туннельного микроскопа НТК «Умка-02Е» позволяет провести 3D визуализацию поверхности тремя способами: без фильтрации шумов, с фильтрацией

шумов усреднением и с фильтрацией шумов медианной фильтрацией. Сравним эти методы на примере нашего дефекта (рис. 5, 6, 7).

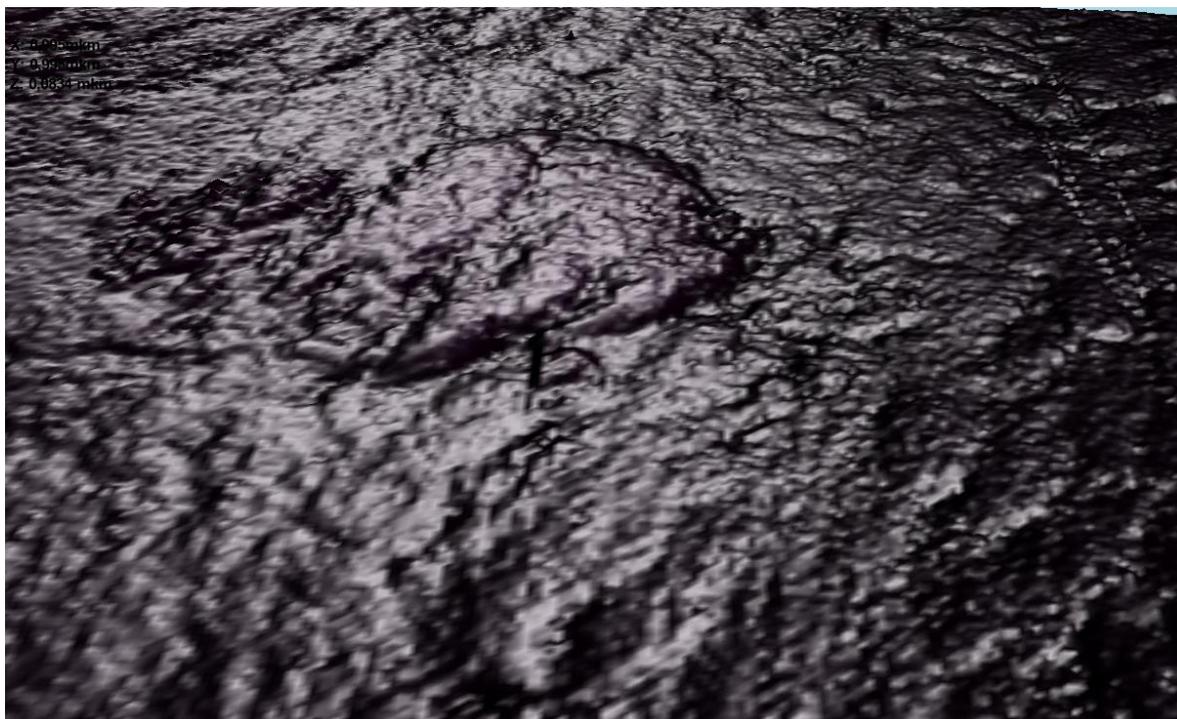


Рис. 5. Без фильтрации шумов

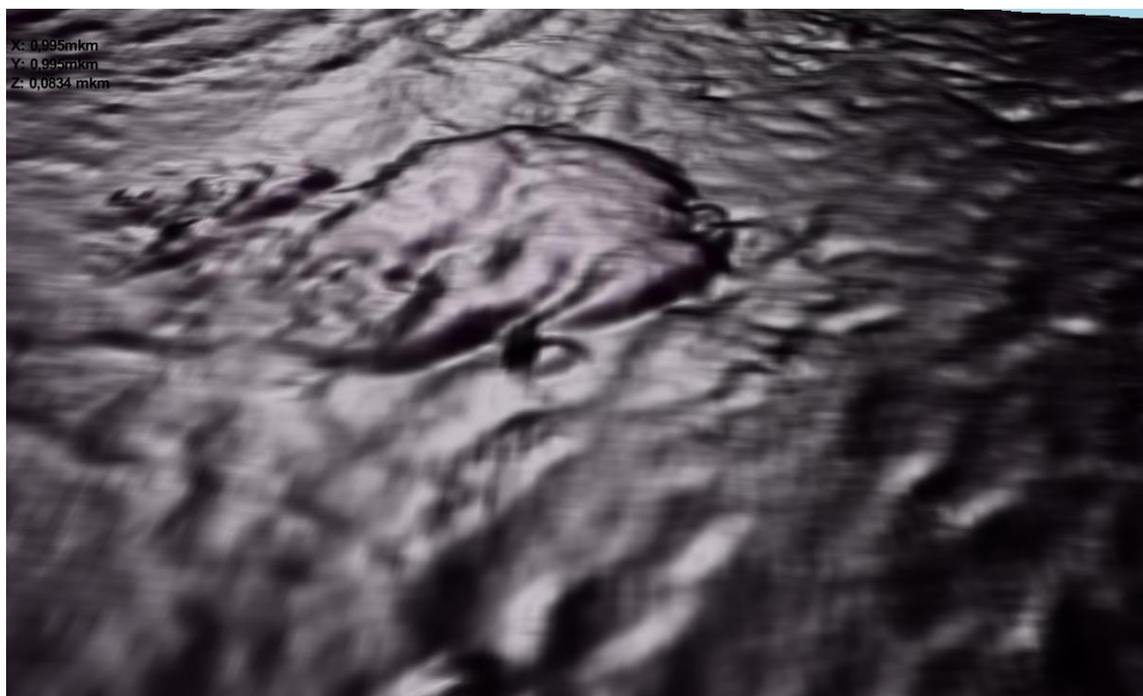


Рис. 6. С фильтрацией шумов усреднением

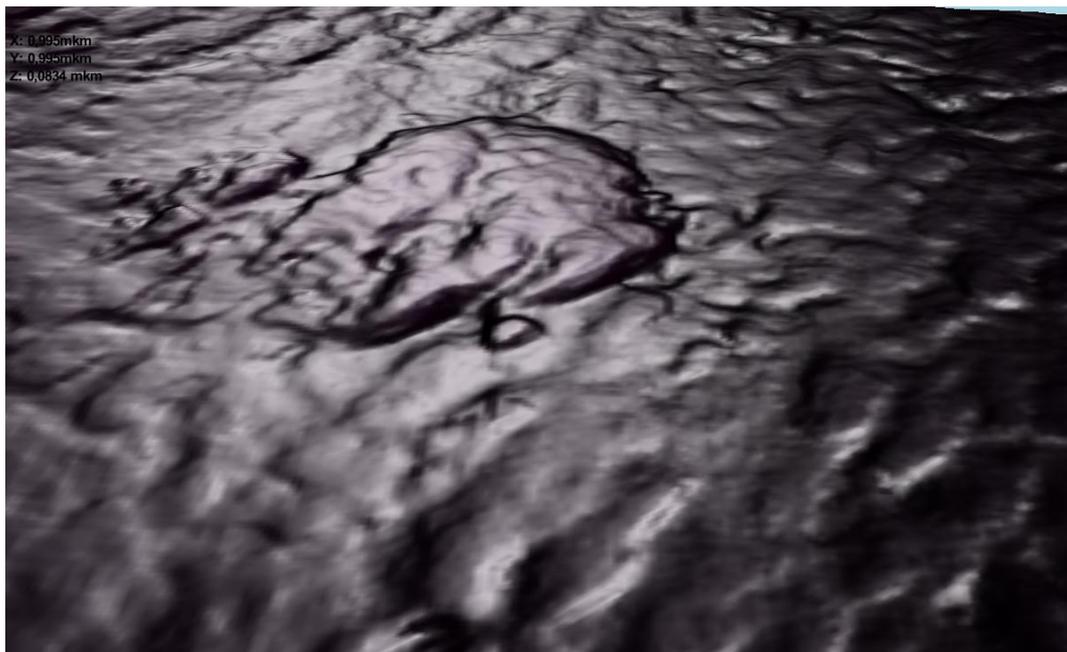


Рис. 7. С фильтрацией шумов медианной фильтрацией

Анализируя качество и отчетливость полученных изображений, можно утверждать, что при использовании метода медианной фильтрации визуальная оценка полученной 3D модели будет произведена точнее, чем при использовании других двух методов. Также для повышения объективности оценки трехмерной визуализации объекта предусмотрена возможность передвижения и поворота модели относительно осей X, Y и Z, то есть дефект можно рассмотреть со всех сторон. Данные возможности не отражены на рис. 5, 6, 7; на рисунках представлено изображение модели в фиксированном положении и с одной и той же точки на всех рисунках.

Так как хром является самым твердым металлом из чистых металлов (без примесей), напыления хрома на различные поверхности представляет большой интерес в частности в области нанотрибологии и смежных с ней областях. Также представляется интересным использование напыления хрома при создании металлорежущего инструмента, в частности режущих пластин для металлообработки. Микротвердость хрома (7500...11000 МПа) сравнима с микротвердостью кубического нитрида бора (эльбора) (7500...9500 МПа), впаивание кристаллов которого распространено в производстве металлорежущих пластин. Этот материал имеет крайне высокие твердость и абразивную способность и обладает высокой теплостойкостью, что позволяет говорить о его высокой износостойкости. Достоинство напыления хрома по сравнению с кристаллом эльбора заключается в возможности достижения более высокой микротвердости, а также хром обладает низким коэффициентом трения, что связано с его мелкозернистой структурой, гладкостью и малой вязкостью. Так, коэффициент трения скольжения хрома по хрому при граничной смазке составляет 0,12, хрома по стали — 0,16, стали по стали — 0,20. Недостатком же является тот факт, что твердость хромовых покрытий снижается при повышении температуры свыше 350 °С, что приводит к невозможности использования пластин, покрытых хромом в случаях, когда температура в зоне резания превышает 350 °С. Однако при некоторых режимах резания это условие может быть соблюдено.

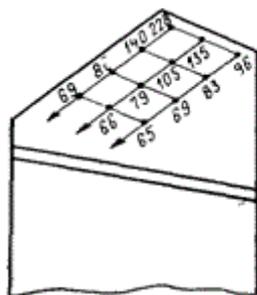


Рис. 8. Температурное поле на поверхности резца

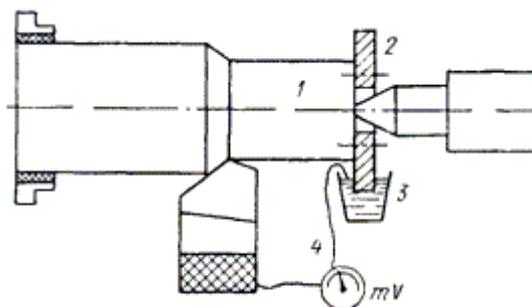


Рис. 9. Схема естественной термопары

На рис. 9 показана схема измерения температуры с помощью естественной термопары, состоящей из самого изделия и режущего инструмента (рис. 10). В процессе резания в месте контакта разнородных материалов изделия и резца вследствие нагрева возникает электродвижущая сила. Ток в этом случае направляется по обрабатываемой детали 1 через медное кольцо 2, а затем через ртуть в ванне 3, служащей для контакта вращающегося кольца 2 с проволокой 4. При этом милливольтметр покажет напряжение термотока, по которому можно судить о температуре резания. Обрабатываемое изделие изолировано от патрона и заднего центра, а резец от суппорта — при помощи прокладок. На рис. 8 представлено температурное поле на передней поверхности резца, полученное при следующих режимах резания: $v = 38$ м/мин, $t = 2$ мм; $s = 0,54$ мм/об. Как видно из рисунка максимум градиента температур составляет 228 °С. Это позволяет утверждать, что покрытие хрома, нанесенное на переднюю поверхность резца при некоторых параметрах скорости, глубины резания и подачи будет работать без потери твердости.

Если рассматривать результаты исследования поверхности напыления хрома с точки зрения нанометрологии, то возникает необходимость оценки погрешностей, самой существенной из которых представляется погрешность, связанная с качеством заготовки зонда, при помощи которого производится сканирование. Элементы исследуемой поверхности, которые меньше диаметра площадки острия зонда, через которую туннельный ток попадает на сканируемую поверхность (так называемое «пятно проводимости»), воспроизводятся с искажениями, как бы осредняются с соседними областями. Возникает необходимость оценки формы и размеров иглы. Собственная же погрешность прибора не превышает 1 \AA .

Опираясь на приведенные выше результаты исследований, можно сделать вывод о том, что сканирующий туннельный микроскоп подходит в качестве прибора контроля качества напылений проводящих металлов. С его помощью возможно получение изображений исследуемой поверхности с высоким разрешением и их обработка, причем это возможно как в режиме 2D отображения информации о топологии поверхности, так и в режиме 3D модели поверхности. По результатам анализа полученных с помощью сканирующего туннельного микроскопа данных в зависимости от требований к поверхности можно провести оценку годности исследуемого образца, а также сделать выводы о возможных причинах возникновения дефекта, опираясь на данные, полученные при изучении трехмерной модели.

Литература

1. *Миронов В.К.* Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2004.
2. *Неволин В.Л.* Зондовые нанотехнологии в электронике. М.: Техносфера, 2006.
3. *Карташев В. А., Карташев В. В.* Исследование движения иглы туннельного микроскопа относительно поверхности // Нано- и микросистемная техника. - 2008. - №6. - С. 13-19.
4. *Золотаревский В.С.* Механические свойства металлов. М.: МИСИС, 1998.
5. *Вульф А.М.* Резание металлов. - М.: Машиностроение, 1973
6. *Резников А.Н.* Теплофизика резания. - М.: Машиностроение, 1969
7. *Грановский Г.И.* Резание металлов. - М.: Высшая школа, 1985

Секция №5
Литейные технологии

УДК 621.74.045

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ФОРМОВОЧНЫХ СМЕСЕЙ

Дарья Александровна Бондарчук

*Студентка 5 курса,
кафедра «Литейные технологии»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: А.В. Иванова,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник ЗАО «Литаформ»*

Основную часть производственной песчано-глинистой смеси составляет отработанная смесь, прошедшая не один термический цикл. Важной задачей является выбор составов смесей, способных выдерживать высокие температуры и сохранять физические свойства при многократных заливках. Кроме того, очень важно иметь представление о динамике изменения свойств формовочной смеси для поддержания заданных свойств и расчета освежения. При выборе составов формовочных смесей необходимо учитывать как температуру заливки сплава, так и металлоёмкость формы. Это особенно важно при изготовлении крупных толстостенных отливок, для которых время воздействия жидкого металла на форму возрастает. Температура поверхности формы при этом может достигать температуры заливки металла, что может привести к оплавлению, спеканию формовочной смеси и как следствие к изменению прочности формы, ее газопроницаемости и ухудшению качества литья.

Для оценки свойств связующих и формовочных смесей на их основе при воздействии температуры существуют следующие параметры:

- *огнеупорность,*
- *термостойкость,*
- *долговечность.*

Под *огнеупорностью* в широком смысле понимают свойство материалов противостоять не сплавляясь температурам не ниже 1580 °С без дополнительной механической нагрузки. Известно [1], что каолиновые глины являются более огнеупорными материалами, чем бентонитовые. Формовочные смеси состоят из нескольких материалов, обладающих различной огнеупорностью. Поэтому следует различать огнеупорности каждого материала отдельно и огнеупорность смеси. На практике могут встречаться «неогнеупорные» смеси, хотя каждый материал в отдельности является «огнеупорным».

Термостойкость характеризует смесь с точки зрения сохранения прочности при определенных условиях нагружения и нагрева [2]. Данное свойство при измерении на образцах зависит от термостойкости связующей композиции и теплофизических свойств песка. Показатель термостойкости бентонита влияет на расход связующего в реальном производстве. Определение термической устойчивости бентонита по ГОСТ 28177-89 является необходимым, но не достаточным для характеристики поведения связующего в процессах заливки.

Под *долговечностью* понимают способность смеси сохранять свои «положительные» свойства после многократных циклов нагрева. Для определения долговечности можно использовать разные параметры: изменение содержания конституционной воды, зернового строения, концентрации водородных ионов. Определение прочностных свойств смеси после каждого цикла нагрева позволяет выявить связь между долговечностью и физико-механическими свойствами.

Нагрев смеси может осуществляться как путем заливки металла в специально подготовленную форму, так нагревом и выдержкой образцов смеси при определенных условиях.

С целью изучения характера изменения физико-механических и химических свойств формовочных смесей при термоциклировании отработке методики определения долговечности в ЗАО «Литаформ» была проведена серия экспериментов по комплексной оценке свойств формовочных смесей на различных типах связующих в процессе циклического нагрева. За основу исследований в данной работе была взята стандартная методика определения долговечности [3].

Характеристика исходных связующих материалов представлена в табл. 1. Формовочные смеси в зависимости от вида связующего обладают различными свойствами. Физико-механические свойства смесей на активированном бентоните в большинстве случаев выше, чем у смесей на неактивированном бентоните и на каолиновой глине. Из представленного материала видно, что наибольшей термостойкостью обладает активированный бентонит, а предел прочности при сжатии во влажном состоянии формовочной смеси после термообработки изменяется в зависимости от типа связующего следующим образом: самым высоким обладает смесь на активированном бентоните (0,90 кг/см²), затем следует неактивированное связующее (0,69 кг/см²), затем – каолиновая глина (0,33 кг/см²).

Табл. 1. Характеристика исходных связующих материалов по ГОСТ 28177-89

Наименование показателя	Наименование образца		
	<i>Хакасский активированный бентонит</i>	<i>Хакасский неактивированный бентонит</i>	<i>Нижнеуельская глина</i>
Предел прочности при сжатии во влажном состоянии, кг/см ²	0,95	0,94	0,39
Предел прочности при разрыве в зоне конденсации влаги, кг/см ²	28	10	6
Предел прочности при сжатии во влажном состоянии после термообработки, кг/см ²	0,9	0,69	0,33
Термостойкость, ед.	0,95	0,73	0,85
Коллоидальность, %	97	31	19
Водопоглощение, ед.	8,5	3	4

Для проведения испытания формовочные смеси готовились из свежих материалов, состав приближен к производственным смесям. Испытания проводились в рабочем интервале влажности, характерном для смесей из свежих материалов. Формовочные смеси на основе бентонита содержали 8% связующего и имели влажность в интервале (2,7...3)%. Смесей на глинистом связующем – 10% глины и влажность (4,5...5)%. В качестве зерновой основы исследуемых смесей использовался

кварцевый песок с модулем мелкости 57...58, средним диаметром зерна 0,22 мм. Смеси приготавливались в лабораторном катковом смесителе.

В процессе исследований производились измерения прочности при сжатии, разрыве, сколе во влажном состоянии, прочности в зоне конденсации влаги, фиксировались влажность, уплотняемость, насыпной вес, а также сорбционная способность и водородный показатель формовочных смесей. После испытаний в исходном состоянии, из всей смеси готовили стандартные образцы, которые выдерживались в муфельной печи в течение часа при температуре 500 °С. Прокалённые и охлаждённые на воздухе до комнатной температуры образцы, разрушали пестиком в ступке и доводили до заданной влажности путем перемешивания в смесителе. После этого проводили измерения описанных выше свойств. Измерения проводили в течение трех циклов нагрева смеси. Каждое испытание проводилось на трех образцах, расхождение между результатами испытаний не более 10% от среднеарифметической величины.

Результаты исследований представлены на рис. 1.1-1.4 и 2.1, 2.2.

Из представленного на рис. 1.1.-1.4, материала видно, что прочностные свойства смеси на Хакасском активированном бентоните значительно выше свойств смесей на основе как неактивированного бентонита, так и каолиновой глины. Особенно низкими свойствами отличается формовочная смесь на основе каолиновой глины. С возрастанием циклов прокали физико-механические и химические свойства формовочных смесей на основе представленных связующих изменяются незначительно.

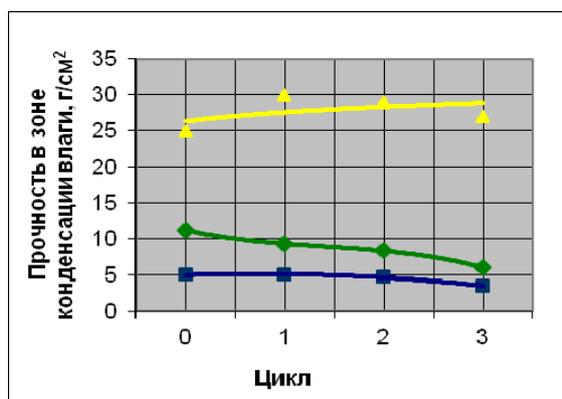


Рис. 1.1. Зависимость прочности при сжатии во влажном состоянии от числа термических циклов

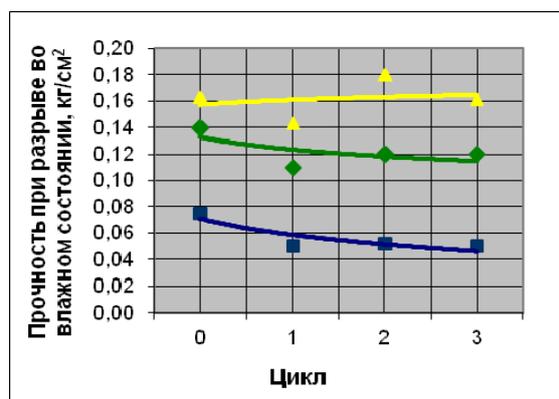


Рис. 1.2. Зависимость прочности при разрыве во влажном состоянии от числа термических циклов

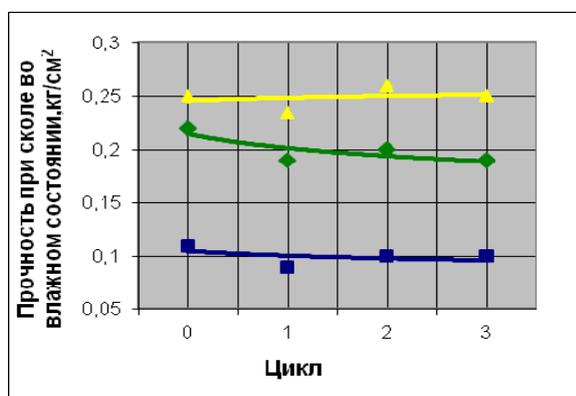


Рис. 1.3. Зависимость прочности при сколе во влажном состоянии от числа термических циклов

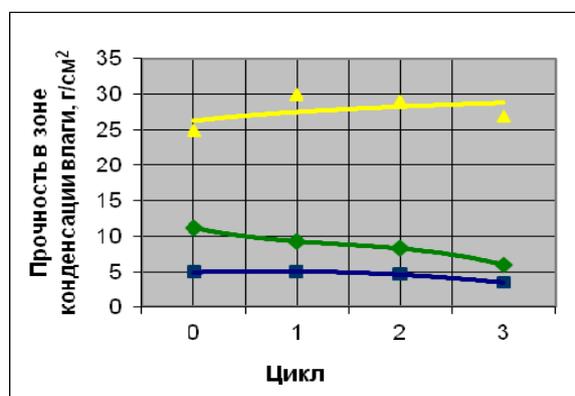


Рис. 1.4. Зависимость прочности в зоне конденсации влаги от числа термических циклов

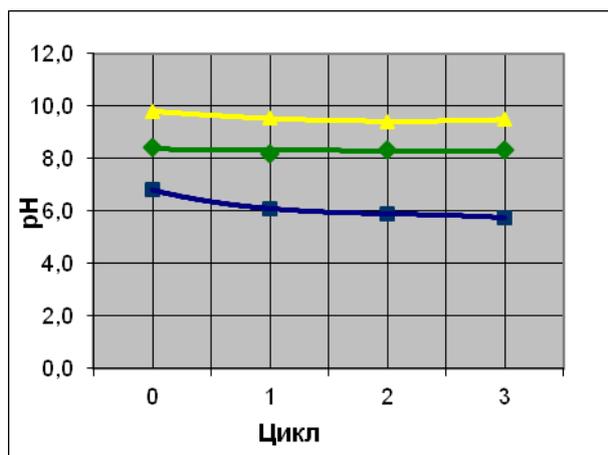


Рис. 2.1. Зависимость водородного показателя ПГС от числа термических циклов

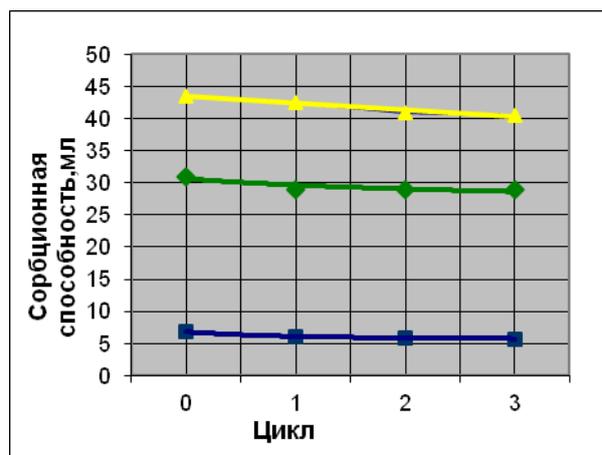


Рис. 2.2. Зависимость сорбционной способности ПГС от числа термических циклов

- Формовочная смесь на активированном Хакасском бентоните;
- Формовочная смесь на неактивированном Хакасском бентоните;
- Формовочная смесь на неактивированном Нижнеувельской глине

Однако необходимо отметить некоторые особенности поведения смесей при термоциклировании в зависимости от типа связующего.

У смеси на основе активированного бентонита наблюдается небольшой прирост прочности при разрыве и сколе во влажном состоянии и прочности в зоне конденсации влаги, при этом прочность при сжатии во влажном состоянии и сорбционная способность смеси уменьшается. У формовочной смеси на основе каолиновой глины с увеличением количества циклов, наоборот, наблюдается некоторое снижение прочности при разрыве и сколе во влажном состоянии и прочности в зоне конденсации влаги с одновременным увеличением прочности при сжатии во влажном состоянии. Изменение прочностных свойств смесей можно объяснить явлением дегидратации – выделение конституционной и цеолитной воды при нагревании. После повторного увлажнения смеси и доведения ее до заданной влажности происходит явление регидратации, т.е. обогащение связующего конституционной и цеолитной водой. При прохождении указанных процессов, часть воды теряется необратимо, и именно этот является причиной изменения свойств смесей при повторных нагревах.

Явление дегидратации часто сопровождается двумя противоположными процессами: спеканием зерен песка и оолитизацией [4]. Спекание зерен песка сопровождается падением прочности смеси, а с другой стороны образованием шамотизированных участков, которые могут превратиться в пыль при повторной обработке в смесителе. Образовавшаяся пыль или, так называемая мелочь, способна временно увеличить прочность смеси при сжатии.

При циклическом нагреве формовочных смесей происходит изменение физико-химического и минералогического состава и содержание примесей (рис. 2.1-2.2). Содержание активного бентонита в смеси – сорбционная способность – с увеличением циклов прокаливания снижается, так как активный бентонит или глина частично выгорают. Изменение водородного показателя характеризует химические изменения,

произошедшие в смеси в результате термических превращений, выгорание примесей, о чем свидетельствует так же изменение цвета формовочных смесей при нагревании.

Таким образом, проведенные исследования по комплексной оценке свойств формовочных смесей на различных типах связующих в процессе циклического нагрева и обработка методики определения долговечности показали следующее:

1. Долговечность ПГС, определяемая по указанной в данном исследовании методике, позволяет судить об изменении свойств связующих в процессе термоциклирования.

2. Полученные значения долговечности коррелируется с определяемым по ГОСТ 28177-89 пределом прочности при сжатии формовочных смесей после термообработки связующего.

3. Указанная методика оценки долговечности ПГС может быть использована в ЗАО «Литаформ» при разработке новых составов песчано-бентонитовых формовочных смесей.

Литература

1. Берг П.П.. Основы учения о формовочных материалах. - М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1948. - С. 280-288.

2. Трухов А.П., Сорокин Ю.А., Ершов М.Ю. и др.; Под ред. А.П. Трухова. -М.: Издательский центр «Академия», 2005. - С. 77-78.

3. ГОСТ 3594.8-77 «Глины формовочные. Метод определения долговечности»

4. Карташов В.Г. Изменение свойств глин и бентонитов при их нагреве/ В.Г. Карташов, Я.И. Медведев, Ю.М. Погосбемян //Литейное производство. -1986. -№7.-С.10-11

УДК 621.74.01

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЛИТНИКОВО-ПИТАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ НА КАЧЕСТВО ОТЛИВОК В БЛОКЕ

Дарья Дмитриевна Коека

Студентка 6 курса,

кафедра «Литейные технологии»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: В.А. Рыбкин,

доктор технических наук, профессор кафедры «Литейные технологии»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Основными функциями литниково-питающих систем являются заполнение формы за расчетное время с минимальными тепловыми потерями и обеспечение рационального распределения температуры в отливке к концу заполнения формы.

В результате использования литниково-питающей системы для получения отливки типа «Крышка» на заводе на выходе получались отливки с браком в виде усадочных раковин до 12%.

Задачами данной работы являлась:

1. Разработка трехмерной модели блока и модели литниково-питающей системы.

2. Моделирование процесса заполнения формы, анализ полученных данных, выявление недостатков стандартной литниково-питающей системы применяемой на автозаводах.

3. Оптимизация стандартной литниково-питающей системы.

По полученным на заводе чертежам отливки и оснастки в программе SolidWorks была разработана 3D-модель литниково-питающей системы:

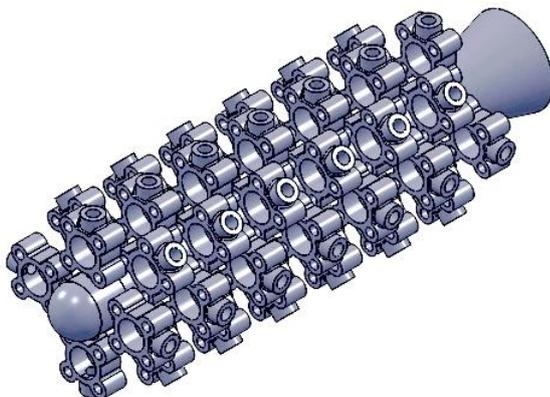


Рис. 1. 3D-модель литниково-питающей системы

Характеристики литниковой системы:

1. Количество отливок в звене – 4.
2. Количество звеньев – 13.
3. Metallоемкость формы (масса жидкого металла) – 18.27 кг.
4. Масса отливки – 112.81 г.
5. Масса литниковой системы – 12.41 кг.
6. Габариты отливки – 100x80x18.
7. Температура заливки – 1863К.
8. Время заливки – не более 10с.

Для анализа существующей литниково-питающей системы использовались следующие данные:

Сплав – Сталь 40ХЛ;

- Плотность стали в твердом состоянии - $\rho_3 = 7840 \text{ кг/м}^3$;
- Теплоемкость жидкого металла - $c_1 = 700 \text{ Дж/(кг*К)}$;
- Температура ликвидуса - $T_L = 1743 \text{ К}$;
- Температура солидуса - $T_S = 1693 \text{ К}$;
- Температура заливки - $T_{\text{зал}} = T_L + 120 \text{ К} = 1863 \text{ К}$;

Форма – керамическая

- Температура формы - $T_{\text{ф}} = 303 \text{ К}$;

Характеристики литниково-питающей системы

- Стояк:

$$F_{\text{ст}} = 1133.54 \text{ мм}^2$$

$$d_{\text{ст}} = 38 \text{ мм}$$

Кол-во – 1 шт.

- Питатели:

$$F_{\text{пит}} = 25 \text{ мм}^2$$

$$a = 5 \text{ мм}$$

$$b = 5 \text{ мм}$$

Кол-во – 52 шт.

В результате проведенных расчетов в программе Flow3d были получены и проанализированы данные по следующим зависимостям:

Распределение температур по объему отливки в конце заливки.

Образование усадочных раковин.



Рис. 2. Распределение температуры в конце заливки

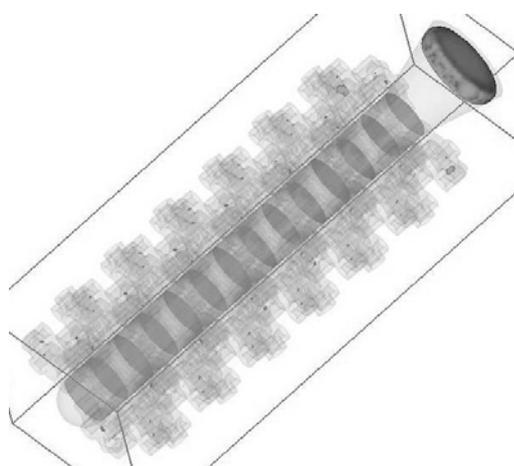


Рис. 3. Образование усадочных раковин в блоке

Из данных рисунков видно, что общая картина распределения температур вполне удовлетворительна (почти во всем объеме отливки температура в пределах 1770...1800К, что выше температуры солидуса – 1693 К), а наиболее крупные усадочные раковины расположены в верхней части блока (образование брака до 12 %).

Соответственно, данная литниковая система требует доработки за счет изменения размеров питателей.

В результате расчета элементов литниково-питающей системы по тепловой теории были получены следующие характеристики:

- Стояк:

$$F_{ст}=530.66\text{мм}^2$$

$$d_{ст}=26\text{ мм}$$

Кол-во – 1 шт.

- Питатели:

$$F_{пит}=16.25\text{ мм}^2$$

$$a=6.5\text{ мм}$$

$$b=2.5\text{ мм}$$

После разработки новой литниково-питающей системы и ее анализа в программе Flow3d были получены следующие зависимости:

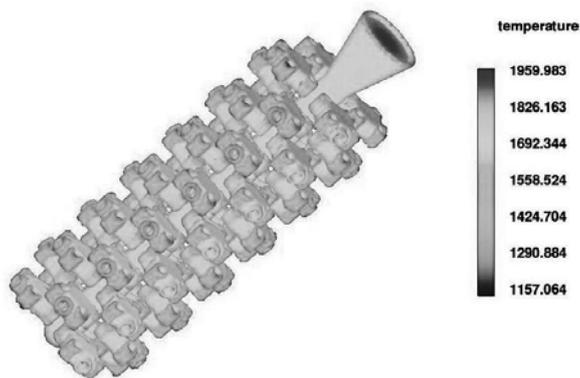


Рис. 4. Распределение температур по объему модельного блока в конце заливки

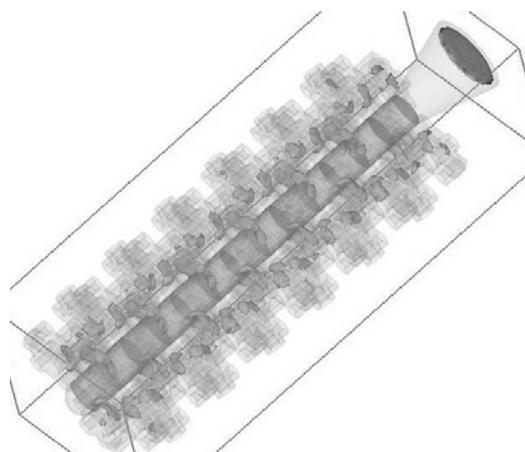


Рис. 5. Образование усадочных раковин

Почти во всем объеме отливки температура в пределах 1690...1500 К, что является недопустимым (ниже температуры солидуса), кроме того, по всему блоку образованы усадочные раковины (100% брака). Данная литниково-питающая система не может использоваться на производстве.

Было предложено изменить размеры питателя уже существующей литниково-питающей системы:

- Стояк:

$$F_{ст}=1133.54\text{мм}^2$$

$$d_{ст}=38\text{ мм}$$

Кол-во – 1 шт.

- Питатели:

$$F_{пит}=30\text{ мм}^2$$

$$a=5\text{ мм}$$

$$b=6\text{ мм}$$

Новые данные:

Во всем объеме отливок температура в пределах 1700...1800 К (выше температуры солидуса), усадочных раковин нет. Соответственно, данная литниково-питающая система полностью подходит для использования в производстве.

Учитывая, что используемый на производстве диаметр стояка 38 мм, а рассчитанный по тепловой теории – 26 мм, была проведена оптимизация литниково-питающей системы за счет уменьшения диаметра стояка.



Рис. 6. Распределение температур по объему модельного блока в конце заливки

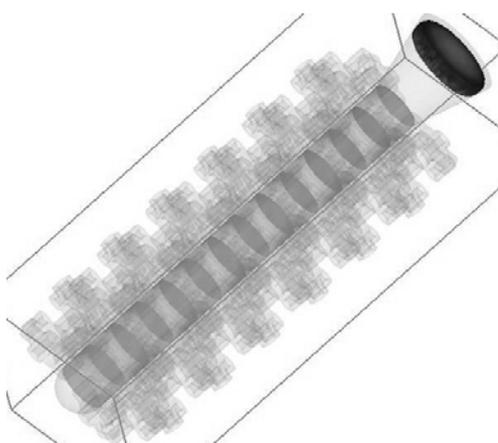


Рис. 7. Образование усадочных раковин

Вариант 1.

- Стояк:

$$F_{\text{ст}}=706.5\text{мм}^2$$

$$d_{\text{ст}}=30\text{ мм}$$

Кол-во – 1 шт.

- Питатели:

$$F_{\text{пит}}=30\text{ мм}^2$$

$$a=5\text{ мм}$$

$$b=6\text{ мм}$$

$$m_{\text{распл.ме}}, - 13.72\text{ кг}$$

Полученные зависимости:



Рис. 8. Распределение температур по объему модельного блока в конце заливки

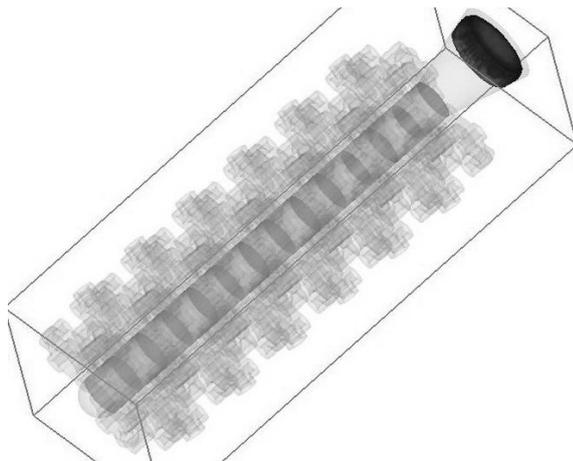


Рис. 9. Образование усадочных раковин

Картина распределения температур удовлетворительна, по всему объему отливок температура в пределах 1700...1800 К, что выше температуры солидуса, усадочные раковины не образуются.

Вариант 2.

- Стояк:

$$F_{\text{ст}}=615.44\text{мм}^2$$

$$d_{\text{ст}}=28\text{ мм}$$

Кол-во – 1 шт.

- Питатели:

$$F_{\text{пит}}=30\text{ мм}^2$$

$$a=5\text{ мм}$$

$$b=6\text{ мм}$$

$$m_{\text{распл.ме}} - 12.78\text{ кг}$$

Полученные зависимости:



Рис. 10. Распределение температур по объему модельного блока в конце заливки

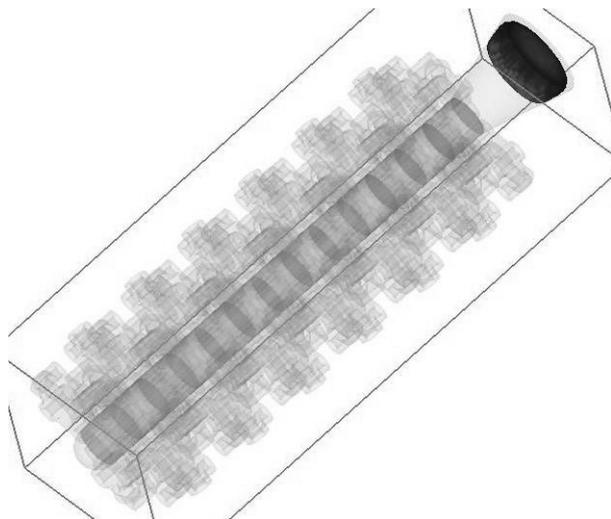


Рис. 11. Образование усадочных раковин

Картина распределения температур удовлетворительна, по всему объему отливок температура в пределах 1700...1800 К, что выше температуры солидуса, усадочные раковины не образуются.

Вариант 3.

- Стояк:

$$F_{ст} = 530.66 \text{ мм}^2$$

$$d_{ст} = 26 \text{ мм}$$

Кол-во – 1 шт.

- Питатели:

$$F_{пит} = 30 \text{ мм}^2$$

$$a = 5 \text{ мм}$$

$$b = 6 \text{ мм}$$

$$m_{распл.ме} = 11.91 \text{ кг}$$

Полученные зависимости:



Рис. 12. Распределение температур по объему модельного блока в конце заливки

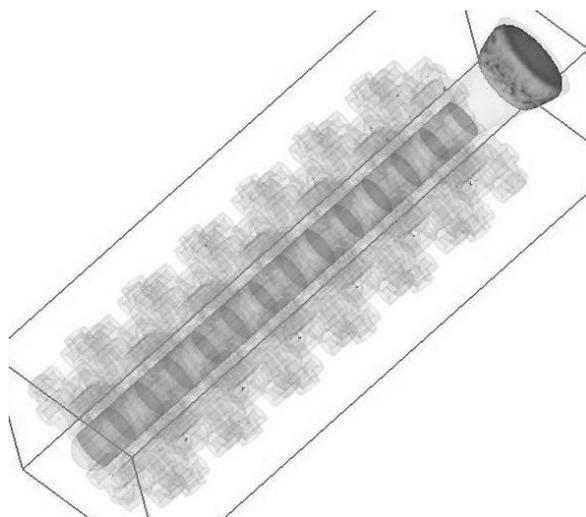


Рис. 13. Образование усадочных раковин

Почти во всем объеме отливок температура в пределах 1690...1600 К, что ниже температуры солидуса, образование усадочных раковин (брак менее 10%).

Наилучшая литниково-питающая система с параметрами:

- Стояк:

$$F_{ст}=615.44\text{мм}^2$$

$$d_{ст}=28\text{ мм}$$

Кол-во – 1 шт.

- Питатели:

$$F_{пит}=30\text{ мм}^2$$

$$a=5\text{ мм}$$

$$b=6\text{ мм}$$

В результате проведенных исследований была получена литниково-питающая система, которая позволяет полностью исключить брак на производстве (0% против 12%) и получить экономию металла до 30% (18.27 кг металла против 12.78 кг).

Литература

1. Я.И. Шкленник и В.А. Озеров Инженерная монография «Литье по выплавляемым моделям» – М.: Машиностроение, 1971.-43бс.

2. А.Ф. Мащенко, А.В. Щекин Расчет литниковых систем для отливок из стали. Методические указания к практической работе для студентов IV курса специальности 110400 «Литейное производство черных и цветных металлов» дневной формы обучения. / Хабаровск, Хабар. Гос. Техн. Ун-т, 1998.

3. Прохоренко В.П. SolidWorks. Практическое руководство.

4. Flow3d. Методические указания.

УДК 53.084.823

ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В ЛИТЬЕ ПОД НИЗКИМ ДАВЛЕНИЕМ

Татьяна Игоревна Сивурова

Студентка 5 курса,
кафедра «Литейные технологии»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: В.А. Рыбкин,
доктор технических наук, профессор кафедры «Литейные технологии»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Основы литья под регулируемым давлением

К литью под регулируемым давлением относят способы литья, сущность которых заключается в том, что заполнение полости формы расплавом и затвердевание отливки происходит под действием избыточного давления воздуха или газа.

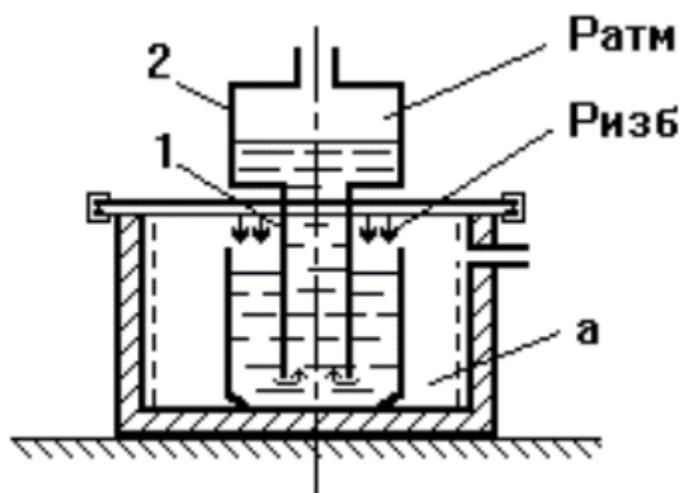


Рис. 1. Способ заполнения - литьем под низким давлением

Литье под регулируемым давлением создает широкие возможности для управления заполнением формы расплавом. Если внутрь герметичной камеры а подавать сжатый воздух или газ под давлением $P_{изб} > P_{атм}$, то за счет разницы давлений расплав поднимется по металлопроводу 1 и заполнит форму 2 до уровня, соответствующего $H = (P_{изб} - P_{атм}) / \rho \cdot g$. Такой способ заполнения называют **литьем под низким давлением** (рис. 1). Термин "низкое давление" используется потому, что для подъема расплава и заполнения формы требуемое избыточное давление менее 0.1 МПа.

Если в герметичной камере б установить вакуум, а в камере а давление поддерживать равное атмосферному, то заполнение формы произойдет за счет разницы давлений $P_{атм} - P$. Такой способ заполнения называют **литьем вакуумным всасыванием** (рис. 2).

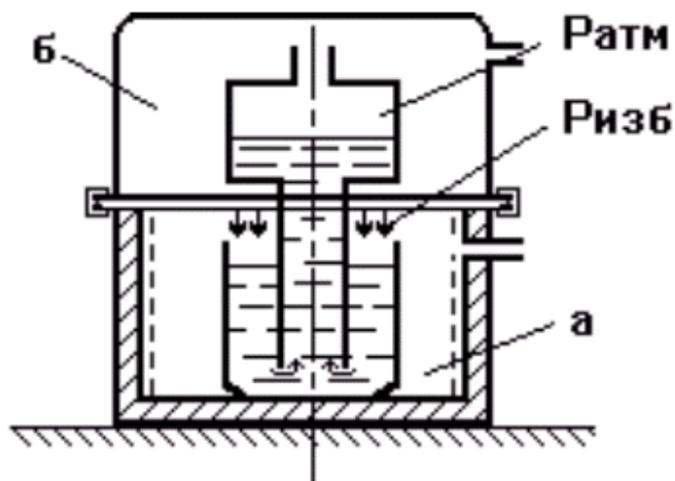


Рис. 2. Способ заполнения - литьем вакуумным всасыванием

Используя схему установки аналогичную данной можно осуществить заполнение формы иначе. Положим, что в камерах а и б вначале создано одинаковое, но больше атмосферного давление воздуха или газа $P_k > P_{атм}$. Затем подача воздуха в камеру б прекращается, а в камеру а продолжается; давление в камере а повышается до $P_k + \Delta P$. Тогда металл будет подниматься по металлопроводу вследствие разницы давлений $P_a - P_b$, т.е. аналогично тому, как и при литье под низким давлением. Того же результата можно достичь, если понижать давление в камере б, оставляя постоянным давление в камере а. Такие процессы называют **литьем под низким давлением с противодавлением**.

Установки для литья под регулируемым давлением - сложные динамические системы, позволяющие в широких пределах регулировать скорость заполнения формы расплавом. Использование таких установок позволяет заполнить формы тонкостенных $\Phi 600$ оливок, изменить продолжительность заполнения отдельных участков формы отливок сложной конфигурации с переменной толщиной стенки с целью управления процессом теплообмена расплава и формы, добиваясь рациональной последовательности затвердевания отдельных частей отливки.

Приложение давления на затвердевающий расплав позволяет улучшить условия питания, усадки отливки, повысить ее качество - механические свойства и герметичность. В рассматриваемых процессах после заполнения формы давление действует на расплав, который из тигля через металлопровод поступает в затвердевающую отливку и питает ее. Благодаря этому усадочная пористость в таких отливках уменьшается, плотность и механические свойства возрастают.

Литье под регулируемым давлением осуществляется на установках так, что процесс заполнения формы расплавом - самая трудоемкая и неприятная с точки зрения охраны труда и техники безопасности операция - выполняется автоматически. Конструкции установок и машин для этих литейных процессов обеспечивают также автоматизацию операций сборки и раскрытия форм, выталкивания отливки и ее удаления из формы. Таким образом, процессы литья под регулируемым давлением позволяют повысить качество отливок и обеспечить автоматизацию их производства.

В практике наибольшее применение нашли следующие процессы литья под регулируемым давлением: литье под низким давлением, литье под низким давлением с противодавлением, литье вакуумным всасыванием, литье вакуумным всасыванием с кристаллизацией под давлением (вакуумно - компрессионное литье).

Литье под низким давлением

Тигель с расплавом в раздаточной печи (камере) установки герметично закрывают крышкой в которой установлен металлопровод, изготовленный из жаростойкого материала. Металлопровод погружают в расплав так, что конец его не достает до конца тигля на 40...60 мм. Форму, установленную на крышке, соединяют с металлопроводом литниковой втулки. Полость в отливке может быть выполнена металлическим, оболочковым или песчаным стержнем.

Воздух или инертный газ под давлением до 0.1 МПа через систему регулирования поступает по трубопроводу внутрь камеры установки и атмосферным давлением расплав поступает в форму снизу через металлопровод, литник и коллектор со скоростью, регулируемой давлением в камере установки. По окончании заполнения формы и затвердевания отливки автоматически открывается клапан, соединяющий камеру установки с атмосферой. Давление воздуха в камере снижается до атмосферного и незатвердевший расплав из металлопровода сливается в тигель. После этого форма раскрывается, отливка извлекается и цикл повторяется.

Основными преимуществами процесса литья под низким давлением являются: автоматизация трудоемкой операции заливки формы; возможность регулирования скорости потока расплава в полости формы изменением давления в камере установки; улучшение питания отливки; снижение расхода металла на литниковую систему.

Основные недостатки невысокая стойкость части металлопровода, погруженной в расплав, что затрудняет использование способа литья для сплавов с высокой температурой плавления; сложность системы регулирования скорости потока расплава в форме, вызванная динамическими процессами, происходящими в установке при заполнении ее камеры воздухом, нестабильностью утечек воздуха через уплотнения, понижением уровня расплава в установке по мере изготовления отливок; возможность ухудшения качества сплава при длительной выдержке в тигле установки; сложность эксплуатации и наладки установок.

Преимущества и недостатки способа определяют рациональную область его применения и перспективы использования. Литье под низким давлением наиболее широко применяют для изготовления сложных фасонных и особенно тонкостенных отливок из алюминиевых и магниевых сплавов, простых отливок из медных сплавов и сталей в серийном и массовом производстве.

Особенности формирования отливки при литье под низким давлением. Заполнение форм расплавом при этом способе литья может осуществляться со скоростями потока, которые можно регулировать в широком диапазоне. Для получения качественных отливок предпочтительно заполнять форму сплошным потоком, при скоростях, обеспечивающих качественное заполнение формы и исключающих захват воздуха расплавом, образование в отливках газовых раковин, попадание в них окисных пленок и неметаллических включений. Однако уменьшение скорости потока, необходимое для сохранения его сплошности может вызвать преждевременное охлаждение и затвердевание расплава, т.е. до полного заполнения формы. Поэтому, как и в других литейных процессах, важно согласовывать гидравлические и тепловые режимы заполнения формы расплавом.

В зависимости от сочетания конструктивных и пневматических параметров установки движение расплава в металлопроводе и литейной форме при заполнении может происходить как при возрастающей скорости потока, так и при колебательном ее изменении. Колебательный характер изменения скорости отрицательно влияет на качество отливок, поэтому конструкция установки и режим работы ее пневмосистемы, а также конструкция вентиляционной системы формы должны способствовать гашению колебаний скорости.

Основными конструктивными параметрами установки являются: объем рабочего пространства камеры, площадь поперечного сечения отверстия металлопровода, площадь зеркала расплава в тигле.

Увеличение объема рабочего пространства камеры установки увеличивает скорость потока, способствует гашению колебаний, но полностью их не исключает.

Уменьшение площади сечения отверстия металлопровода в установках с объемом рабочего пространства менее 0.07 м^3 приводит к резкому гашению колебаний и увеличению скорости течения расплава, в установках с объемом рабочего пространства более 0.4 м^3 увеличение площади сечения отверстия металлопровода не влияет на характер движения потока и скорость расплава на входе в форму.

Увеличение площади зеркала расплава в тигле при условии постоянства массы расплава в нем способствует спокойному заполнению. Поэтому установки с тиглем ванного типа, в которых зеркало расплава достаточно велико, более предпочтительны, так как обеспечивают устойчивый режим работы.

Увеличение гидравлического сопротивления на входе расплава в металлопровод приводит к снижению ускорения расплава в начале заполнения и гасит возникающие колебания.

Важное значение для обеспечения постоянства заданной скорости от заливке к заливке, т.е. по мере понижения уровня расплава в тигле, имеет система управления подачей воздуха в камеру установки. Системы регулирования по величине давления целесообразно использовать только в установках ванного типа. При этом точность регулирования должна быть в пределах $0.01 \dots 0.05 \text{ МПа}$; это обеспечивает поддержание скорости заливки с погрешностью $10 \dots 15 \%$. Для установок ванного типа используют дроссельные системы регулирования.

Конструкция полости формы и конструкция ее вентиляционной системы также оказывают влияние на характер движения расплава в полости формы. При заполнении форм сложных отливок с ребрами, бобышками создаются условия для захвата воздуха потоком расплава. Гидравлическое сопротивление полости формы оказывает существенное влияние на характер движения потока. Конструкция вентиляционной системы влияет на характер движения потока расплава в полости формы и металлопроводе. Уменьшение площади вентиляционных каналов приводит к возрастанию противодавления воздуха в полости формы, способствует гашению колебаний и снижает скорость потока расплава.

Тепловые условия формирования отливки создают возможность направленного затвердевания отливки и питания ее усадкой. Части формы, расположенные на верхней плите рабочей камеры установки нагреваются до температуры большей, чем верхняя часть формы. Кроме того, через нижние сечения полости формы, расположенные ближе к металлопроводу, проходит большее количество расплава, чем через сечения, расположенные в верхней части, что существенно увеличивает разницу температур в нижней и верхней частях отливки. Поэтому массивные части отливки, требующие питания, располагают внизу формы, соединяют их массивными литниками с металлопроводом; сверху же формы располагают части отливки, не требующие питания.

Статическое давление на расплав по окончании заполнения формы улучшает контакт затвердевающей корочки и поверхности формы, вследствие чего увеличивается скорость затвердевания отливки. Вместе с тем давление воздуха на расплав в тигле способствует постоянной подпитке усаживающейся отливки, в результате чего

уменьшается усадочная пористость, возрастает плотность и повышаются механические свойства отливки.

Избыточное давление в потоке расплава при заполнении формы больше, чем при гравитационной заливке, и гидравлический удар, который может возникнуть при окончании заполнения формы, приводит к прониканию расплава в поры песчаного стержня, появлению механического пригара на отливках.

При литье под низким давлением стремятся заполнить форму расплавом с возможно меньшим перегревом, достаточным для хорошего заполнения формы. С уменьшением толщины стенки отливки и увеличением ее размеров температуру заливки принимают большей. Литниковые системы конструируют с учетом литейных свойств сплава и конструкции отливки. Для отливок простой конфигурации литниковая система может состоять из одного литника, непосредственно примыкающего к массивной части, для более сложных тонкостенных отливок - из литника, литниковых ходов, коллектора и питателей.

Литье с противодавлением

Развитие литья под низким давлением является литье с противодавлением. Установка для литья с противодавлением состоит из двух камер. В камере, устройство которой подобно герметической камере установки литья под низким давлением, располагается тигель с расплавом. В камере находится форма, обычно металлическая. Камеры разделены герметичной крышкой, через нее проходит металлопровод, соединяющий тигель и форму. Эти камеры прочно соединены друг с другом зажимами.

Давление воздуха, под которым происходит заполнение формы расплавом, будет соответствовать равно разнице давлений в нижней P_a и верхней P_b камерах установки: $P = P_a - P_b$. Скорость подъема расплава в металлопроводе и полости формы так же, как и при литье под низким давлением, будет зависеть от всей совокупности рассмотренных выше конструктивных и пневматических характеристик системы, определяющих скорость нарастания разницы давлений P , во время работы установки.

Литье с противодавлением позволяет уменьшить выделение газов из расплава, улучшить питание отливок и вследствие этого повысить их герметичность, а также механические свойства. Этот способ литья дает наибольший эффект при изготовлении отливок с массивными стенками равномерной толщины из алюминиевых и магниевых сплавов, кристаллизующихся в широком интервале температур. Использование второй стадии процесса - кристаллизации под всесторонним избыточным давлением для тонкостенных отливок не всегда приводит к заметному улучшению свойств. Это объясняется тем, что продолжительность кристаллизации тонкостенных отливок мала и отливка затвердевает прежде, чем давление в верхней камере установки достигнет необходимой величины.

Литье вакуумным всасыванием

Сущность процесса литья вакуумным всасыванием состоит в том, что расплав под действием разряжения, создаваемого в полости формы, заполняет ее и затвердевает, образуя отливку. Изменением разности между атмосферным давлением и давлением в полости формы можно регулировать скорость заполнения формы расплавом, управляя этим процессом. Вакуумирование полости форм при заливке позволяет заполнить формы тонкостенных отливок с толщиной стенки 1...1.5 мм, исключить попадание воздуха в расплав, повысить точность, и механические свойства отливок.

В производстве используют установки двух основных разновидностей.

Установки первого типа имеют две камеры: нижнюю и верхнюю. Нижняя камера представляет собой раздаточную печь с электрическим или газовым обогревом,

в которой располагается тигель с расплавом. Верхняя камера расположена на крышке нижней камеры, в крышке установлен металлопровод. Форму устанавливают и закрепляют в камере так, чтобы литник соединился прижимами с крышкой. Полость верхней камеры через вакуум-привод соединена с ресивером, в котором насосом создается разрежение, регулируемое системой управления. В начальный момент клапан управления открывается, в верхней камере создается разрежение, и расплав вследствие разницы давлений в камерах по металлопроводу поднимается и заполняет полость формы. После затвердевания отливки клапан системы управления соединяет полость верхней камеры с атмосферой, давление в обеих камерах становится одинаковым, а остатки незатвердевшего расплава сливаются из металлопровода в тигель. Верхняя камера снимается, форма с отливкой извлекается и цикл может повторяться.

Установки такого типа используют обычно для улучшения заполнения форм тонкостенных сложных фасонных отливок из алюминиевых и магниевых сплавов с толщиной стенки 2...2.5 мм, а иногда и до 1...1.5 мм.

Установки второго типа используют для отливки втулок, слитков и заготовок простой конфигурации в водоохлаждаемых системах кристаллизаторы. Носок металлического водоохлаждаемого кристаллизатора погружается в расплав, находящийся в тигле раздаточной печи. Рабочая полость кристаллизатора, образующая отливку, соединяется вакуумом-проводом с вакуумным ресивером. Разрежение в системе создается вакуумом-насосом и регулируется натекалем. Поворотом распределительного крана рабочая полость кристаллизатора соединяется в вакуумным ресивером. В полости кристаллизатора создается разрежение, и расплав всасывается внутрь кристаллизатора, поднимаясь на высоту, пропорциональную разрежению $h_{рт}$ и обратно пропорционально ее плотности. После затвердевания отливки носок кристаллизатора извлекают из ванны расплава, поворотом крана, рабочую полость соединяют с атмосферой и отливка выпадает из кристаллизатора в приемный короб.

Особенности формирования отливки. Форма может заполняться расплавом с требуемой скоростью, плавно, без разбрызгивания, сплошным фронтом; расплав, заполнивший форму, затвердевает в условиях вакуума; газы, содержащиеся в расплаве, могут из него выделяться, благодаря чему создаются условия для получения отливок без газовых раковин и пористости. Для получения плотных отливок без усадочных дефектов необходимо согласовывать интенсивности затвердевания и питания отливки.

Обычно при литье вакуумным всасыванием слитков, втулок, расплав засасывают в тонкостенный металлический водоохлаждаемый катализатор, благодаря чему отливка затвердевает с высокой скоростью.

Таким способом можно получать тонкостенные отливки типа втулок без стержней. В этом случае после всасывания расплава в кристаллизатор и намораживания на внутренних стенках кристаллизатора корочки твердого металла заданной толщины вакуум отключается и незатвердевший расплав сливается обратно в тигель. Таким образом получают плотные заготовки втулок без газовых и усадочных раковин и пористости. Способ позволяет получать отливки из легких цветных и медных сплавов, чугуна и стали. Наиболее часто этот способ используется для литья заготовок втулок, вкладышей, подшипников скольжения из дорогостоящих медных сталей. При этом наиболее ярко проявляются **основные преимущества** данного способа: спокойное заполнение формы расплавом с регулируемой скоростью, сокращение расхода металла в следствии устранения литников и прибылей, автоматизация процесса заполнения формы.

Структура САПР литейной технологии используемой для литья под низким давлением

Для литейного производства и науки современного аппарат исследований органично включает модели, алгоритмы и программы для описания гидродинамических, тепловых, усадочных и ряда других процессов, происходящих при течении металла, затвердевании и формировании структуры отливки. Программные продукты, содержащие комплекс этих средств, объединенных в технической литературе под термином «Система автоматизированного моделирования» (САМ) и формируют активно развивающуюся область объективного анализа литейной технологии.

Независимое развитие средств синтеза и анализа литейной технологии создает углубляющееся размежевание методологии научной специализации программ для ЭВМ. Ситез ЛТ представляет собой комплекс проектных и расчетных процедур, выполняемых для формирования набора текстовой и графической документации, необходимой для производства отливок. Анализ ЛТ представляет собой систему расчетных процедур, необходимых для оценки качества технологической разработки. Интеграция различных программных модулей, выполняющих функции синтеза и анализа ЛТ, осуществляется в интегрированной САПР.

Основные потребительские функции ИСАПР реализуются с помощью универсальных модулей, которые инвариантны к условиям проектирования и производства (конфигурация отливки, способ литья, технологическое оборудование).

Проектирование технологии производится в несколько этапов:

- этап формирования эскизного варианта в части расположения отливки в пространстве, выбора схемы подвода металла, питания.
- этап проектирования литой детали, определение размерных и режимных параметров технологии.
- этап формирования технологической документации.

В дальнейшем, на основании результатов численного анализа отдельных этапов или сквозного моделирования технологии производится прогнозирование размеров литейных дефектов, механических свойств и структуры, происходит корректировка технологии изготовления отливок. В частности, для изготовления литых заготовок деталей из алюминиевых сплавов, к которым предъявляются повышенные требования по прочности, пластичности, герметичности, гидроплотности, при толщине стенки не более 1,5 мм может быть предложен метод литья под низким давлением.

В настоящее время существуют различные точки зрения относительно структуры и функций САПР литья под низким давлением, в литературе также имеется множество разрозненных моделей, описывающих отдельные процессы, протекающие при формировании отливки, изготавливаемой ЛНД. Однако, численное моделирование любого из процессов, имеющих место при изготовлении отливок, с точки зрения непосредственного использования его результатов в условиях реального производства, технологически и экономически оправданно только в случае, если математическая модель реализована в виде законченного программного продукта, адаптированного к условиям конкретной технологии. В противном случае численное моделирование становится достоянием узкого круга профессионалов-разработчиков, оторвано от условий реального производства и разработки технологии.

Анализ публикаций показывает, что в отечественной литературе отсутствуют описания САПР ЛНД, основанных на детерминированных моделях, описывающих все стадии процесса ЛНД. Имеются лишь описания САПР на основе имперических

зависимостей, позволяющие для конкретной отливки подобрать оптимальные режимы заполнения и параметры технологии, обеспечивающие эти режимы.

В последние годы появились публикации болгарских специалистов ведущих работу над разработкой САПР ЛНД на основе дорогостоящего программного продукта MAGMASOFT. Принципиальная схема предлагаемой ими САПР включает следующие блоки:

1. Программный модуль заполнения формы на основе уравнения Навье-Стокса, решение которого дает распределение скоростей и давлений по сечению отливки.

2. Модуль численного расчета формирования дефектов типа газоусадочной пористости, так как считается, что механические свойства отливок зависят от их микроструктуры (модуль построен на основе системы нелинейных диффуз, включающих уравнения сплава, междендритной диффузии, массопереноса, уравнения баланса водорода, с его помощью появляется возможность проанализировать влияние параметров процесса ЛНД на образование пористости в отливках).

3. Матмодель, описывающая изменение давления газа над расплавом в амуре установки и в форме, дающая возможность предложит закон изменения давления газа, котрый обеспечил бы контроль над заполнением формы расплавом и задавал определенную в модуле 1 скорость движения металла.

4. Модуль определения теплофизических характеристик системы форма-металл на основе экспериментов и результатов работы пакета MAGMASOFT.

5. Модуль оптимизации параметров процесса ЛНД.

В настоящее время в результате развития и увеличения количества работ по численному моделированию ряда литейных процессов могут быть получены достоверные представления о гидравлических и гидродинамических параметрах заливки форм, интенсивности теплообмена и распределении температур в отливке при затвердевании и остывании, а также кинематике формирования литой структуры. На основе результатов моделирования разработаны и внедрены в производство системы автоматизированного проектирования литейной технологии для производства отливок из чугуна, стали и ряда цветных сплавов. Однако до сих пор не осуществлен надлежащий системный анализ взаимосвязанных процедур синтеза ЛТ для литья под низким давлением.

Математические модели процесса движения расплава

Анализ литературных данных показывает, что наличие большого количества параметров, определяющих режим течения металла привел к тому, что до настоящего времени отсутствует единая методика подхода к расчету движения расплава. Существующие в настоящее время методы решения условно можно разделить на две группы.

В первой из них используется сложный математический аппарат теоретической гидродинамики, прилагаемый к достаточно простым схемам движения жидкости, при допущениях и предложениях, упрощающих сложную картину течения жидкости. В частности, при таком подходе не водятся усредненные характеристики потока. Интегрированием уравнения Навье-Стокса аналитически или численными методами получается детальная картина течения потока металла. Несмотря на высокую сложность решения, именно эта группа задач переживает в последнее десятилетие свое «второе рождение».

Первой и главной причиной этого является использование возможностей, которые открылись в связи с постоянно прогрессирующим развитием электронно-

вычислительной техники. Становятся доступными не только расчеты, ранее немислимые из-за их сложности, но и эксперименты качественно иного типа – эксперименты с использованием ЭВМ, имеющие ряд несомненных преимуществ по сравнению с натурными. Второй причиной служит значительное расширение арсенала математических средств, применяемых в гидродинамике.

Но, как ни странно, именно эти причины, расширяющие границы применения методов гидродинамики, являются в настоящее время своего рода «ограничителями». Высокие требования к вычислительной технике, продолжительные по времени расчеты, высокоточные геометрические модели – все это зачастую становится препятствием использования этих методов, в особенности, в условиях производства, где это более всего необходимо. Большая продолжительность расчетов по времени делает нерентабельным использование этих методов в условиях быстрой смены номенклатуры выпускаемых изделий.

Все эти причины, очевидно, определили потребность и повсеместное использование другой группы решений гидравлической задачи течения металла, в которой используются методы технической гидромеханики, базирующейся на результатах экспериментальных исследований, существенно упрощенных картинах течения и оценках только главных характеристик изучаемого явления, которые определяются осредненными характеристиками. Эти методы позволяют дать более или менее приближенные ответы на большинство вопросов литейной практики.

В частности, возникающие при математическом описании процесса течения металла в системе тигель-металлопровод-полость литейной формы в установке ЛНД трудности приводят к тому, практически во всех случаях при разработке математических моделей приходится прибегать к их идеализации, внося ряд допущений. Подробный анализ существующих моделей, описывающих этот процесс дан в монографии Г.П. Борисова.

Автор отмечает, что в первых моделях процесса движения жидкого металла при заливке форм ЛНД, представленных в работах 60-70х годов, при описании процесса было принято уравнение Бернулли. Однако автор считает, что применимость этой модели ограничивается тем условием, что на всем протяжении потока его движение должно быть плавно изменяющимся, кроме того, «расчет напора, затрачиваемого на преодоление сил инерции находящейся между рассматриваемыми сечениями жидкости, строго говоря, требует определения направления и длины линий тока между этими сечениями, что определяет весьма сложную задачу».

Дальнейшие исследования авторов Б.К. Уразбаева, Б.С. Чуркина и В.Н. Майорова привели к тому, что для описания движения расплава под действием создаваемого в камере установки избыточного давления p_y , было предложено использовать неоднородное нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$(zA_M + B_M) \frac{d^2 z}{dt^2} + D_M \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 + C_M z = p_y,$$

где A_M , B_M , C_M , D_M – коэффициенты, характеризующие соотношения постоянных параметров (ρ , g , F_M – сечение металлопровода, F_T – сечение тигля).

В более поздних работах начала 90-х годов Л.Ю. Тихонравова, Э.Б. Гофмана, В.К. Шнитко и др. исследователей свердловской школы движение расплава было опять таки описано уравнением гидравлики – уравнением Бернулли.

Анализируя характер влияния на режимы заливки форм изменения давления газа по заданному закону, определяемому значениями исходного давления газа в

подводящей давление сети, мы можем наблюдать, что в данном случае характер изменения давления газа в установке подчиняется экспоненциальному закону:

$$P_y = P_{BX} [1 - \exp(-\beta t)],$$

где β - газодинамический фактор, определяющий темп нарастания и перепада давления, описываемый империческим уравнением типа:

$$\beta = A(\mu_d \omega_d)^\alpha Z^\gamma P_{BX}^\nu V_S^\nu,$$

где μ_d - коэффициент расхода газовой системы, ω_d - площадь проходного сечения дросселирующего устройства, V_S - величина усреднено учитывающая изменение объема воздуха в зависимости от геометрических параметров, A , α , ν , γ - расчетные коэффициенты, для вычисления которых предложены громоздкие имперические формулы с большим количеством трудно определяемых коэффициентов.

Недостатки формулы вполне очевидны. Одним из них является назначение величины β , определение которой связано с расшифрованием назначения входящих в формулу эмпирических параметров. Вторым наиболее существенным недостатком является то, в результате расчета по формуле определяется конечное значение перепада давления, независимо от характера изменения давления газа над расплавом в тигле и форме, и в этом случае характер изменения носит экспоненциальный закон, несмотря на то, что изменение рабочего давления в камере установки может носить более сложный характер.

Диагностика режимов заливки.

Основная цель выбора оптимальных режимов заливки – отсутствие дефектов в отливке, возникающих на стадии заполнения формы. Каждый из гидравлических параметров процесса заполнения формы жидким расплавом может определять возникновение конкретного вида литейного брака. Основной проблемой на этапе анализа гидравлического режима является учет многофакторности процесса. Взаимное влияние параметров течения расплава может определять совершенно противоположные результаты при изменении значения одной из этих величин.

Анализ критериев диагностической оценки гидравлического режима течения расплавленного металла безотносительно от способа литья был проведен в диссертационной работе О.В. Прихожего. Среди же большого количества критериев диагностической оценки процесса ЛНД, как уже отмечалось, следует выделить:

1. Степень турбулентности потока.
2. Скорость, обеспечивающая отсутствие фонтана.
3. Захват плены в тело отливки.
4. Оптимальную продолжительность заполнения литейной формы.

В литературе предложены различные построенные по экспериментальным данным номограммы для определения конкретных параметров получения той или иной отливки при литье под низким давлением, обеспечивающие оптимальные с точки зрения рассмотренных критериев режимы

Проведен обзор существующих методов расчета указанных критериев, а также влияющих параметров, по данным различных авторов для конкретных отливок, выполняемых методом ЛНД из алюминиевых сплавов. Такая привязанность расчетных формул для оценки критических значений параметров гидравлического режима делает актуальной задачу использования принципов, методов и средств фундаментальных и технических наук для преодоления прикладных проблем литейного производства,

одним из методов решения которых является построение детерминированных моделей процессов, происходящих в литейной форме и при ЛНД в частности.

Математические модели процесса образования газоусадочной пористости.

Основным дефектом, поражающим отливки из алюминиевых сплавов на стадии затвердевания, является газоусадочная пористость. Склонность литейных сплавов к этому явлению хорошо известна и литейщики имеют с ним дело каждый день. Существуют различные способы борьбы с газовой пористостью в отливках, одним из них является дегазация расплава перед заливкой. Метод ЛНД предоставляет еще один способ борьбы с этим пороком – повышение газового давления над затвердевающим расплавом в форме, об эффективности этого способа пишут многие авторы.

В литературе не существует диагностических критериев оценки образования газоусадочной пористости, поэтому также как и для диагностики режимов заполнения одним из методов решения этой задачи является построение детерминированной модели. В 80-х годах как в отечественной, так и в зарубежной литературе появляются модели, описывающие процесс порообразования. Все они основываются на том, что пузырьковое выделение водорода возможно лишь на подложке, которой является растущий дендрит, при условии, что действительное содержание водорода в расплаве при данных условиях становится выше критического содержания водорода в сплаве при этих условиях.

Различие в этих моделях состоит в том, что в одних из них рассматривается чисто процесс образования газовой пористости, в других первичным рассматривается процесс образования усадки, а самостоятельное формирование газовой пористости не учитывается, считается лишь, что высвободившийся в ходе кристаллизации водород за счет резкого снижения его растворимости в твердой фазе по отношению к жидкой заполняет образующиеся усадочные поры. Однако, разделение пористости на усадочную и газовую весьма условно, поэтому необходимо рассматривать эти процессы во взаимосвязи как равновозможные.

В моделях авторов показано, как термодинамические данные сплава могут быть скомбинированы с моделью кристаллизации сплава, в ходе которой образуется дендритная структура, для описания условий образования газовой пористости. В частности, для описания дендритной структуры используется понятие первичной оси дендритов, которая определяется через градиент температур и скорость кристаллизации следующим выражением:

$$d_1 = \overline{AG}^\alpha R^\beta$$

где $\overline{G} = \frac{T_L - T_S}{W}$ (-ширина зоны затвердевания), A , α , β - коэффициенты.

Можно с уверенностью сказать, что применение этой формулы достаточно ограничено, так как в нее входят трудно поддающиеся измерению коэффициенты. Поэтому видится необходимым переработать эту формулу таким образом, чтобы в нее входили характеристики, влияющие на величину G и R , и были известны для данного конкретного сплава и формы из справочников.

Недоработкой авторов является также и то, что они рассматривают изменение растворимости водорода в расплаве лишь за счет изменения температуры, не включая во внимание влияние локального давления, которое в свою очередь является функцией многих параметров.

Еще одной слабостью этих моделей является то, что все расчеты характеристик сплавов рассчитываются из равновесной двойной диаграммы состояния (Al-Cu) и не учитывается влияние различных технологических факторов на эти характеристики. Решением этой проблемы может быть создание термодинамической модели

многокомпонентного сплава, основанной на фундаментальной физико-химической характеристике – энергии Гиббса, которая бы выступила в качестве информационной базы для тепловой задач и задачи кристаллизации многокомпонентного сплава.

Постановка задачи

Процесс изготовления отливки определяется в общем виде двумя основными этапами: этапом заполнения полости формы и этапом затвердевания и образования структуры. Значение каждого из них достаточно велико, оба они являются взаимосвязанными, что обязательно должно быть учтено при формировании технологии получения качественной отливки, особенно это актуально для метода ЛНД.

В этих условиях на первый план выходит задача создания концепции САПР применительно для ЛНД, вторым вопросом является разработка компьютерных моделей, входящих в разрабатываемую САПР.

Процесс заполнения полости формы расплавом изучается довольно давно и является предметом дискуссии не одного поколения литейщиков, но единого мнения по поводу формы математического описания данного процесса не существует. Процесс заполнения форм при ЛНД осложняется тем, что он тесно связан с газодинамическими процессами, протекающими в установке во время заливки формы. Сложность и многофакторность протекающих на этой стадии процессов определяет потребность в формировании отдельных гидрогазомеханической и термогидродинамической математических моделей. До настоящего времени остаются не вполне изученными следующие основные моменты:

1. В каком виде основные уравнения классической гидравлики могут быть использованы для описания закономерностей течения металла в форме при различных способах заливки.

2. В какой мере возможно совместное решение гидрогазомеханической и термогидродинамической задач течения металла, когда выходные параметры первой из них становятся исходными для расчета гидродинамической картины течения и охлаждения расплава в форме при ЛНД.

3. Каковы прикладные аспекты изучения рассматриваемого этапа формирования отливки при ЛНД, как с точки зрения анализа и диагностики гидравлического режима течения металла, так и регулирования оптимальных соотношений технологических параметров установки ЛНД.

Вторым и заключительным этапом формирования отливки является процесс охлаждения расплава в форме и кристаллизация отливки. Именно на этой стадии имеются предпосылки для возникновения газоусадочной пористости, которая поражает отливки и при ЛНД в том числе. Этот процесс определяется как тепловыми так условиями так формирования отливки, так и свойствами сплава и конфигурацией формы. Наиболее результативными с точки зрения полноты анализа процесса представляется совместное решение сопряженных задачи теплообмена отливки с формой, задачи кристаллизации, отягощенной расчетом теплофизических характеристик и параметров кристаллизации в каждый момент времени, и задачи образования пористости.

Литература

1. Ю.А. Степанов, Г.Ф. Баландин, В.А. Рыбкин. Технология литейного производства. - М.: Машиностроение, 1983.

2. Б.С. Чуркин, Э.Б. Гофман, А.Б. Чуркин и др.: - Екатеринбург: Изд-во УГПШУ, - 2000. - 662 с. Гриф Минобразования РФ. Чуркин Б.С., Гофман Э.Б., Чуркин А.Б., Категоренко Ю.И. Теория литейных процессов.

3. В.К. Шнитко. Основные технологические параметры процесса получения тонкостенных отливок под низким давлением/ Процессы литья, 1991, 4, С. 48-52

4. Э.Б. Гофман, А.Б. Чуркин, А.Ю. Шаболин. Автоматизация технологических расчетов при литье под низким давлением. Сборник научных статей. Свердловск, 1990г.

УДК 621.7-97

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ МИКРООТЛИВОК С АМОРФНОЙ СТРУКТУРОЙ

Юрий Олегович Фокин, Леонид Вячеславович Пастухов

*Студенты 5 курса,
кафедра «Литейные технологии»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научные руководители: А.Ю. Коротченко⁽¹⁾, С.Н. Поляков⁽²⁾,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейные технологии»⁽¹⁾,
доктор технических наук⁽²⁾,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

Открытие аморфных металлических сплавов (также называемых металлическими стеклами) внесло большой вклад в науку о металлах, существенно изменив наши представления о них. Оказалось, что металлические сплавы с аморфной микроструктурой разительно отличаются по своим свойствам от металлических кристаллов, для которых характерно упорядоченное расположение атомов. Очевидные преимущества аморфной структуры - отсутствие границ зерен дает совершенно новый уровень качества деталей: высокую прочность, пластичность, коррозионную стойкость.

Наиболее распространенным способом получения аморфной структуры для металлических сплавов является закалка из жидкого состояния (рис. 1). Кривая скорости охлаждения сплава (на рис. 1 показана упрощенно в виде прямой) должна проходить ниже кривой изотермического зарождения кристаллов (кривая начала кристаллизации на рис. 1). В этом случае кристаллы не возникают, а снижения подвижности атомов при более низких температурах стабилизирует первоначальную аморфную структуру жидкости.

Поскольку, получение отливки связано с переходом из жидкого состояния в твердое, то закалка из жидкого состояния является естественным способом получения аморфной структуры отливок. Получение крупных аморфных литых фасонных деталей проблематично из-за относительно невысоких скоростей охлаждения имеющих место в обычной литейной практике.

Однако современная техника имеет большую тенденцию к миниатюризации машин и приборов, где большую роль могут играть микролитые детали. Для отливок таких деталей создание высоких скоростей охлаждения не является уже неразрешимой задачей. В современных аморфных сплавах аморфитизация наступает уже при скоростях охлаждения $10^3 \dots 10^4$ К/с.



Рис.1. Кинетическая диаграмма получения аморфного металлического сплава путем закалки из жидкого состояния.

Для литых заготовок в форме лент и проволоки наиболее часто, на практике, используются два метода: в первом жидкий металл наносят на внешнюю цилиндрическую поверхность вращающегося диска (колеса), во втором расплав извлекается вращающимся диском. На рис. 2 представлены схемы устройств, реализующих указанные методы. Обод металлического диска или цилиндра изготавливается из материала, обладающего хорошей теплопроводностью (медь, бронза, латунь). Струя расплавленного металла вытекает под небольшим давлением (0,2 атм.) через инжекционное сопло, которое сделано из плавленого кварца или окиси алюминия. Струя попадает на поверхность быстро вращающегося колеса и затвердевает в виде непрерывной ленты шириной от 1 до 20 мм и толщиной 20...40 мкм.

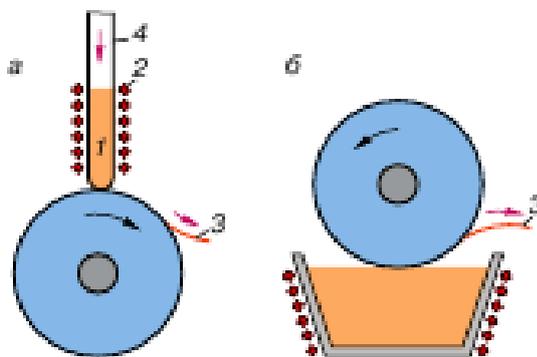


Рис. 2. Схема устройств:

- а* – нанесение расплава на вращающийся металлический диск или цилиндр;
- б* – извлечение расплава вращающимся диском

Во втором методе заостренный обод диска захватывает расплав, который затем затвердевает и самопроизвольно отделяется в виде коротких проволочек. Частота вращения диска или цилиндра должна быть такой, чтобы обеспечить линейную скорость обода не менее 50 м/с.

Известно, что при контакте двух тел с разной температурой в начальный момент возникают очень высокие градиенты температур, которые соответствуют высоким скоростям нагрева и охлаждения соответственно. Если одно тело намного массивнее другого и используется как холодильник, то кратковременно существуют условия для создания очень высокой скорости охлаждения. Высокая скорость охлаждения заготовок в описанных методах достигается путем кратковременного контакта с холодильником, частью поверхности массивного диска или цилиндра, нагрев которого быстро

снимается в последующей более длительной фазе охлаждения. Метод легко реализовать конструктивно для тонких лент и проволоки и, может быть для некоторых профильных конфигураций, но получить заготовки, такие как фасонные отливки, технологически невозможно.

При охлаждении отливки в форме высокая начальная скорость охлаждения быстро уменьшается за счет повышения пристеночной температуры формы вследствие низкой теплопроводности обычных формовочных материалов. Таким образом, основная проблема достижения высоких скоростей охлаждения в форме связана с устранением, или уменьшением ее разогрева. Естественные пути решения проблемы – повышение теплопроводности и увеличения тепловой аккумуляции формы. Этот путь имеет существенные ограничения по свойствам современных материалов. Однако, если конструктивно разделить формообразование отливки и ее охлаждение, то при таких вариантах организация высоких скоростей становится возможной.

Одним из вариантов представляется охлаждение отливки вместе с формой в криогенной жидкости. В этом случае форма должна обладать достаточной прочностью и жесткостью, чтобы оформлять геометрию отливки, но одновременно иметь высокую теплопроводность, т.е. высокую теплопроводность и малую толщину стенки. Например, можно использовать технологию изготовления графитовых форм. В этом случае тепловой поток будет определяться отношением значений теплопроводности формы и ее толщины $\lambda_{\phi}/\Delta_{\phi}$, а также коэффициентом теплоотдачи α с поверхности формы в кипящую криогенную жидкость. Известно, что при определенных условиях вынужденной конвекции эти коэффициенты могут принимать высокие значения.

Вторым технологическим способом может быть организация контактного теплообмена через поверхность формы с массивным твердым холодильником. Конечно, требования к прочности и жесткости формы здесь будут выше, чем в первом варианте.

В соответствии с этими двумя способами организации охлаждения могут быть сконструированы установки для получения микроотливок с аморфной структурой. Для разработки конструкции этих установок необходимо знать необходимые параметры управляющие теплообменом между отливкой и формой, а также их взаимосвязь с конструктивными параметрами установки и технологическими параметрами отливки. В настоящей работе проводится анализ условий охлаждения микроотливок в двух вариантах: охлаждение микроформы в криогенной жидкости и кондуктивное охлаждение в массивной медной форме.

Оценка режимов криогенного охлаждения микроотливки в тонкостенной форме

Охлаждение формы с отливкой происходит в криогенной жидкости (предположительно жидком азоте). При этом температура стенки формы T_c , контактирующая с охлаждающей средой намного выше температуры кипения ($T_k = 77.4$ К при атмосферном давлении).

Различают два основных режима кипения жидкостей: пузырьковый и пленочный, которые определяют и два режима охлаждения поверхности. Пузырьковый режим является началом всякого процесса кипения. Пленочный режим кипения связывают с кризисом в развитии пузырькового кипения. Т.е. увеличения парообразования ведет к объединению отдельных пузырьков в сплошную газовую подушку, отделяющую охлаждающую поверхность от охлаждающей жидкости. Интенсивность теплообмена при этом резко снижается. Этот процесс нестабилен и состоит в периодическом прорыве газовой подушки и повторном развитии

пузырькового кипения – второе кризисное явление. Иногда говорят о «гистерезисе» теплообмена при кипении.

Для упрощения расчетов примем, что отливка представляет собой тонкую пластину толщиной 1 мм. Толщина стенки формы равна 1 мм (рис. 3).

Теплообмен между стенкой формы и охлаждающей средой вследствие турбулизации в граничном слое носит комбинированный характер и состоит из охлаждения пристеночных слоев жидкости за счет интенсивного парообразования с теплотой испарения 5.57 Дж/моль и принудительного конвективного охлаждения двухфазным потоком стенки формы. Интенсивность последнего зависит от скорости потока, или от числа Рейнольдса. При высоких скоростях жидкости в пограничном слое может происходить подавления парообразования за счет срыва пузырьков пара еще не достигших критического диаметра, достаточного для отрыва от стенки. Такие пузырьки уносятся потоком от стенки формы и захлопываются с выделением энергии. Теплообмен в этом случае будет проходить преимущественно по модели принудительной конвекции.

Интенсивность теплообмена при конвективном теплообмене в жидкости характеризуется безразмерным коэффициентом теплоотдачи Нуссельта $Nu = \alpha \delta_T / \lambda$, где α - коэффициент теплоотдачи Ньютона, δ_T - толщина теплового пограничного слоя жидкости, где температура изменяется от температуры стенки до температуры жидкости в удаленных слоях, λ - коэффициент теплопроводности жидкости. Физический смысл этого числа заключается в соотношении интенсивности теплоотдачи на охлаждаемой/нагреваемой поверхности от конвекции α и от теплопроводности λ / δ_T .

Можно предположить, что высокая теплотдача с поверхности формы будет связана со срывом пленочного кипения и турбулизацией пристеночной области, что должно описываться моделью турбулентного пограничного слоя. Для вычисления числа Нуссельта при обтекании пластины потоком жидкости в турбулентном пограничном слое ($Re > 4 \cdot 10^4$) рекомендуют использовать соотношение:

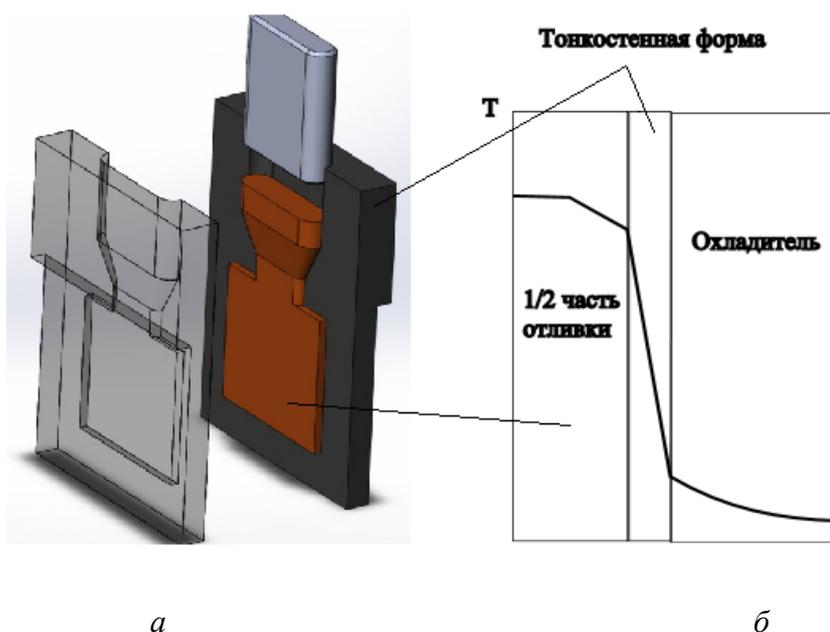


Рис. 3. Эскиз отливки в форме (а) и схема к анализу теплообмена (б)

$$\overline{Nu} = 0.664 \overline{Re}^{-0.50} Pr^{0.33} \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0.25}$$

Коэффициент теплоотдачи зависит от того, нагревается ли жидкость или охлаждается. Градиент температуры в пограничном слое при нагревании больше, чем при их охлаждении. Зависимость α от направления теплового потока учитывается множителем $\left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0.25}$, где Pr_w - число Прандтля жидкости, взятое при температуре

стенки. При нагревании жидкости величина $\left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0.25}$ несколько больше единицы. Для оценочных расчетов примем ее значение равным 1. Таким образом, получаемые оценочные значения коэффициента теплоотдачи будут несколько меньше, т.е. дается нижняя оценка коэффициента теплоотдачи.

Для капельных жидкостей можно использовать поправку Рейнольдса с поправкой на число Прандтля, при этом соответствующие значения чисел Нуссельта, будут равны:

$$Nu_x = \frac{c_f}{2} Re_x^n Pr^{0.4}$$

$$Nu_x = 0.037 Pr^{0.4} Re_x^{0.8}$$

Следовательно, для нашей задачи для расчета конвективного теплообмена следует пользоваться формулой

$$Nu = 0.037 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (1)$$

Значение коэффициента Прандтля для жидкого азота при $T = -190$ °С равно 20.

Для оценки эффективного значения коэффициента теплоотдачи, учитывающего одновременный эффект от кипения и конвективного теплообмена существует много приближений. Для кипения при вынужденной конвекции интенсивность теплоотдачи зависит от соотношения коэффициента турбулентного переноса, вызываемого кипением и движением жидкости. При больших скоростях движения жидкости определяется законами турбулентного движения $\alpha \sim w^{0.8}$. В зависимости от соотношения коэффициента теплоотдачи при чистом кипении α_1 и коэффициента теплоотдачи при вынужденном движения без кипения α_0 в общем случае принимают равным:

$$\alpha_{эфф} = \alpha_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_0} \right)^2}$$

где α_0 - значение коэффициента теплоотдачи, рассчитываемого без учета кипения жидкости α_1 - коэффициент теплоотдачи ($Вт/м^2К$) при развитом пузырьковом кипении. Для пузырькового кипения жидкого азота в состоянии насыщения при свободной конвекции полагают $\alpha_1 = 4.7 \cdot 10^4$ Вт/м²К. Получим оценочное значение коэффициента α_0 в условиях вынужденной конвекции потока вдоль охлаждаемой поверхности формы с использованием формулы (1). При $Pr = 20$, и Рейнольдс на границе перехода от ламинарного режима в граничном слое к турбулентному $Re = (3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^6)$ - это число конечно зависит от состояния поверхности формы и развития режима кипения, и может быть значительно меньше. Рассмотрим условия

теплообмена при максимальном значении Рейнольдса, имея в виду, что реальное значение может быть существенно меньше, получим число Нуссельта:

$$Nu = 0.037 \cdot (3 \cdot 10^6)^{0.8} 20^{0.4} \approx 18634$$

Толщину пограничного теплового слоя приближенно можно оценить по критериальному соотношению:

$$\delta_T \approx \frac{L}{\sqrt{Re Pr}} = \frac{0.02}{\sqrt{3 \cdot 10^5 \cdot 20}} = 0.81 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

У Гухмана дается приближенная оценка толщины динамического пограничного слоя δ_D исходя из равенства сил инерции и сил трения. Это ведет к приближенной формуле для оценки гидродинамического пограничного слоя ($\delta_D \approx L/\sqrt{Re}$), где за характерный размер L можно взять средний поперечный размер поверхности формы, контактирующей с охлаждающей жидкостью (далее примем этот размер равным 0.02 м, т.е. 2 см).

Т.к. $Pr = 20$, то тепловой слой полностью содержится в динамическом слое. Коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции без учета кипения будет $\alpha_0 = Nu \cdot \lambda / \delta_T = 18634 \cdot 0.14 / 0.26 \cdot 10^{-4} = 10^8$ Вт/м²К. Это означает, что вынужденная конвекция в данных условиях вносит в теплообмен преобладающий эффект:

$$\alpha_{эфф} = 10^8 \sqrt{1 + (4.7 \cdot 10^4 / 10^8)^2} \approx 10^8 \text{ Вт / м}^2 \text{ К}$$

Максимальная скорость истечения жидкого азота из сопла получается из значения Рейнольдса для турбулентного режима $Re = 3 \cdot 10^6$, вязкости расплава и характерного размера формы $L = 0.2$ м, обтекаемой потоком жидкости:

$$V = Re \cdot \nu / L = 3 \cdot 10^5 \cdot 1.74 \cdot 10^{-6} / 0.02 = 26.1 \text{ м / с}$$

Полученные оценки коэффициентов теплообмена и скорости принудительно движения жидкости достаточны для проектирования экспериментальной установки, где эти параметры должны изменяться в определенном диапазоне, с конечной целью получения необходимых и, может быть в некотором смысле оптимальных скоростей охлаждения для создания аморфной структуры микроотливок. Заметим, что используемое для оценки критическое значения Рейнольдса ($3 \cdot 10^5$) достаточно высоко и реальное будет, скорее всего, меньше. Но, это только усиливает выдвинутые положения о преобладающем влиянии вынужденного конвективного теплообмена.

Оценка режимов контактного охлаждения микроотливки в тонкостенной форме в массивный твердый холодильник

Для анализа контактного теплообмена необходимо прежде всего иметь отчетливые представления о профиле поверхности и знать параметры шероховатости и волнистости, решить контактную задачу типа Герца с учетом шероховатости, определить площадь фактического контакта, средний размер пятен пятна микроконтакта и осредненную конфигурацию зазора. Каждая из этих задач является сложной.

С достаточной для практических расчетов точностью профиль шероховатой поверхности может быть описан стационарной случайной функцией, имеющей нормальное распределение.

Две твердые поверхности приходят в соприкосновение по вершинам отдельных выступов. Образующаяся таким образом площадь фактического контакта состоит из

отдельных площадок, расположенных на разных высотах и под разными углами. Так как угол наклона элементов профиля к геометрической поверхности невелик (даже при грубой обработке он не превышает 20° , а при шлифовании не превышает 10°), то отличие величины пятен фактического контакта от их проекций на плоскость, параллельную рассматриваемым поверхностям, незначительно. При соприкосновении двух шероховатых поверхностей форма пятен приближается к кругу.

Средний размер пятен при увеличении нагрузки изменяется незначительно, а рост площади фактического соприкосновения происходит в основном за счет увеличения числа пятен. Более того, эксперименты показывают, что размеры пятен контакта для различных материалов близки.

Последнее обстоятельство особенно ценно для рассмотрения тепловых явлений, так как дает возможность теоретически подойти к оценке термического сопротивления любого контакта.

Микровыступы шероховатости весьма стойки против внешних нагрузок. При контактных давлениях, не превышающих $(100 \dots 200) \cdot 10^5$ Па, относительное сближение соприкасающихся поверхностей (или, что то же, относительная деформация выступов шероховатости) невелика особенно при повторных нагружениях. Поэтому величина зазора между соприкасающимися поверхностями при их сжатии в указанных пределах изменяется незначительно.

По мере увеличения силы сжатия две соприкасающиеся поверхности сближаются за счет деформации микронеровностей, обеспечивая вступление в контакт все большего количества точек и рост фактической площади соприкосновения.

Для задачи контактного теплообмена большой интерес представляет вопрос формирования реальной площади касания и сближение при различных видах деформации микронеровностей (рис. 4).

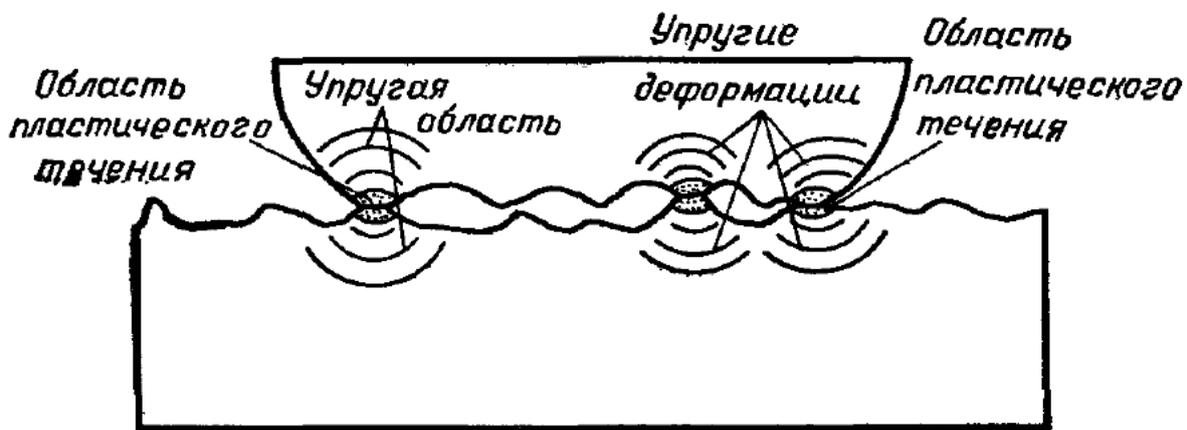


Рис. 4. Деформация микровыступов

При охлаждении методом контактного теплообмена литейная форма будет подвергаться серьезным механическим воздействием, также она должна обладать высокой теплопроводностью, поэтому форму целесообразно изготавливать из меди. Таким образом мы будем рассматривать контакт двух медных поверхностей.

Выражение для расчета величины сближения и относительной площади фактического контакта:

$$\eta = \frac{N}{S_H \cdot C \cdot \sigma_T} + 2.7 \frac{b^v \cdot v \cdot \rho}{h_{\max}} \left(\frac{1 - \mu^2}{E} \right)^2 \cdot (C \cdot \sigma_T)^{\frac{1+v}{v}} \cdot \left(\frac{N}{S_H} \right)^{\frac{v-1}{v}}$$

где $C=3$, $\mu=0,37$ (коэффициент Пуассона), $\sigma_T=258$ МПа, $E=123000$ МПа.

Первое слагаемое характеризует площадь, соответствующую пластической деформации, второе – выражает площадь упруго деформированных выступов. Как показывают расчеты и экспериментальные исследования, для классов чистоты обработки не выше 10го величина ϵ_k весьма мала. Поэтому для определения площади фактического контакта можно с некоторым приближением ограничиться первым слагаемым.

$$\eta = \frac{N}{3 \cdot S_H \cdot \sigma_T} = \frac{N}{3 \cdot 250 \cdot 258} = \frac{N}{193500}$$

$$\eta(N) = \frac{1}{193500} \cdot N$$

где N зависит от характеристик привода. Допустим, что нагрузка приложенная к стенке формы равна 50000 Н, тогда

$$\eta(50000) = \frac{1}{193500} \cdot 50000 = 0.25$$

Общая тепловая проводимость контакта складывается их термической проводимости мест фактического контакта и термической проводимости газового зазора.

Формула для первоначального нагружения:

$$\alpha_K = \alpha_C + \alpha_M = \frac{\lambda_C \cdot Y}{h_{01} + h_{02}} + 1.6 \cdot 10^4 \cdot \frac{\overline{\lambda_M}}{\psi_t \cdot \psi_k} \cdot \frac{p}{3 \cdot \sigma_B}$$

$$\psi_k = 1 + 0.5k, \text{ где } k=0.05 \dots 0.15$$

$$\psi_k = 1 + 0.5 \cdot 0.1 = 1.05$$

В качестве σ_B берется предел прочности материала.

$$\psi_t = 1 - 1.41 \cdot \eta^{\frac{1}{2}} + 0.3 \cdot \eta^{\frac{3}{2}}, \text{ где } \eta = 0.25$$

$$\psi_t = 0.33$$

$$\alpha_K = \alpha_C + \alpha_M = \frac{3 \cdot 10^{-2} \cdot 2}{1.6 \cdot 10^{-6}} + 1.6 \cdot 10^4 \cdot \frac{400}{1.05 \cdot 0.33} \cdot \frac{200}{3 \cdot 394} = 37500 + 3125282 \approx 3.16 \cdot 10^6 \frac{Bm}{m^2 \cdot K}$$

Приведенные расчеты по критериям подобия носят оценочный характер, и следует ожидать точности в пределах порядка искомых величин. Более точные расчеты могут быть проведены после проведения экспериментов на проектируемой установке.

Далее необходимо провести сравнение значений коэффициентов теплообмена в двух способах и их технологические "за" и "против", и к каким скоростям охлаждения эти коэффициенты приводят.

Литература

1. *А.В. Лыков.* Тепломассообмен. Справочник. М.: Энергия, 1978. -480с.
2. *С.С. Кутателадзе.* Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. -416с.
3. *А.А. Гухман.* Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массообмена. М. Высшая шк., 1974. -327с.
4. *А.Н. Павленко, И.П. Стародубцева.* Переходные процессы при кипении. УДК 536.248. Институт теплофизики СО РАН, С. 32-41.

5. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. М.: Энергия, 1977. - 328 с.

6. И.В. Золотухин. Аморфные металлические материалы. / И.В. Золотухин // Соросовский образовательный журнал. - №4. - 1997. – С. 73-78.

УДК 621.74.045

ДЕФЕКТЫ МОДЕЛЕЙ ПРИ ЛВМ И СПОСОБЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ

Камила Касимовна Халикова

*Студентка 5 курса,
кафедра «Литейные технологии»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: В.А. Рыбкин,
доктор технических наук, профессор кафедры «Литейные технологии»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Сущность литья по выплавляемым моделям (далее ЛВМ) заключается в применении разовых, точных, неразъемных, керамических оболочковых форм, получаемых по разовым моделям с использованием жидких формовочных смесей. Перед заливкой модель удаляют из формы выплавлением, выжиганием, растворением или испарением [1]. Качество получаемых отливок зависит от многих факторов: от сложности отливки, от качества формы, компонентов из которых создана эта форма, от качества связующего, от способа заливки (заливка открытым способом требует нанесения дополнительных укрепляющих слоев формы, существует риск «треска» формы при заливке, заливка с слоем огнеупорного материала в опоке требует соответствующего качества материалов), от выбранной литниково-питающей системы, от моделей, от пресс-формы (формы для изготовления выплавляемых моделей), которые должны соответствовать определенным требованиям.

В данной работе рассматривается влияние качества выплавляемых моделей на качество получаемой отливки.

Дефекты выплавляемых моделей можно подразделить на устранимые и неустраняемые. Неустраняемые дефекты возникают в результате преждевременного извлечения модели из пресс-формы, запираения в полости пресс-формы пузырьков воздуха большого объема, из-за сложности пресс-формы, несовершенства модельного состава (недостаточной прочности) и других причин. Устранимые дефекты удаляют при подготовке модели к припайванию или приклеиванию к питателям и/или литниково-питающей системе.

Устранимые дефекты, возникающие в выплавляемых моделях можно разделить на группы в зависимости от причин, которыми они вызваны:

1. Дефекты, возникающие из-за неподходящего состава и качества модельной массы для изготовления выплавляемых моделей
2. Дефекты, возникающие из-за оборудования для приготовления модельной массы и для запрессовки/заливки в пресс-формы
3. Дефекты, возникающие из-за недостаточной точности, несоответствия требованиям пресс-форм

4. Дефекты, возникающие из-за неправильного подвода модельной массы в пресс-форму

5. Дефекты, возникающие из-за несоблюдения технологического режима (время выдержки перед нанесением первого слоя суспензии, повышенный нагрев модельной массы, перегрев шприца или пресс-формы)

6. Дефекты литейного характера (недоливы, неспаи)

7. Дефекты, возникающие из-за «человеческого фактора» (недостаточная очистка полости пресс-формы перед заполнением, при наличии дополнительных элементов пресс-форм отсутствие их на момент заполнения пресс-формы и т.д.).

Рассмотрим каждую группу отдельно.

1. Дефекты, возникающие из-за неподходящего состава и качества модельной массы для изготовления выплавляемых моделей.

Выбор модельного состава должен основываться на требованиях к качеству моделей, на условиях окружающей среды (при повышенных температурах необходимо выбирать более теплоустойчивые модельные составы), на возможности обслуживания и простоте дальнейшей обработки моделей.

Если при перемешивании возвратного модельного состава и новых компонентов отсутствует фильтрация компонентов, в смесь могут попасть инородные элементы, образуя засоры в моделях.

Если модельный состав недостаточно теплоустойчив или в помещении, где хранятся модели не поддерживается необходимый температурный режим, при наличии с модели воздуха, который неизбежен, если модельный состав запрессовывается в пресс-формы в пастообразном состоянии, на поверхности модели возникают пузырьки воздуха, желающего освободиться (рис. 1), также возможно изменение геометрии модели, что ведет к невозможности устранить возникший дефект.

При повышенном содержании стеарина в составе модельной композиции можно наблюдать «иероглифы», рисунок на поверхности модели (рис. 2), также стеарин плохо смачивается суспензией [2].



Рис. 1. Пузырек воздуха на поверхности модели



Рис. 2. «Иероглифы» на поверхности модели

Исходные материалы для приготовления модельных составов:

Парафин — воскоподобное вещество, смесь предельных углеводородов (алканов). Получают главным образом из возгонки нефти, бурого угля или горячих сланцев. вещество белого цвета кристаллического строения с молекулярной массой 300...450, в расплавленном состоянии обладает малой вязкостью. Дешевый и недефицитный материал. Для изготовления моделей применяется очищенный технический.

Стеарин – (фр. *stearine*), от греч. *stear* — жир) — органический продукт, получаемый из жиров а именно смесь твердых жирных кислот. Состоит из стеариновой кислоты с примесью пальмитиновой, олеиновой и других насыщенных и ненасыщенных жирных кислот. Недостаток стеарина склонность взаимодействия к гидролизным растворам этилсиликата и его дефицитность.

Жирные кислоты — алифатические одноосновные карбоновые кислоты с открытой цепью, содержащиеся в этерифицированной форме в жирах, маслах и восках растительного и животного происхождения. Жирные кислоты, обладают свойствами схожими со стеарином, но более хрупки. Обычно применяются взамен стеарина

Буроугольный воск – состоит из воска, смолы, асфальтоподобных веществ. Последнее не рекомендуются для модельных составов. Применяется для увеличения прочности моделей. Недостаток - повышенная вязкость.

Церезин — смесь предельных углеводородов с числом атомов углерода в молекуле от 36 до 55. Церезин имеет более высокую пластичность и температуру размягчения, чем все вышеприведенные материалы. Недостатки церезина: значительная линейная усадка, не высокие прочность и твердость.

Этилцеллюлоза – один из простых эфиров целлюлозы, белый или светло-желтый кристаллический порошок. Температура плавления 160...180 °С. Хорошо смешивается с жидким стеарином и церезином. Обладает высокой теплостойкостью и прочностью. Недостаток - увеличенная в сравнение с другими материалами усадка.

Канифоль – Канифоль (греч. *πίσσα Κολοφώνια*, лат. *colophonía resina*) — колофонская смола — хрупкое, стекловидное, аморфное вещество от тёмно-красного до светло-жёлтого цвета. Входит в состав смол хвойных деревьев и получается из живицы (смолистого вещества (терпентин), выделяющегося при ранении деревьев хвойных пород). Канифоль растворима в органических растворителях (спирте, ацетоне, эфире, бензоле, хлороформе), нерастворима в воде.

Полистирол – продукт полимеризации стирола (винилбензола) относится к полимерам класса термопластов. Полистирол имеет низкую плотность (1060 кг/м³), термическую стойкость (до 105 °С), усадка при литьевой переработке 0,4...0,8 %. Для улучшения свойств полистирола его модифицируют путём смешения с различными полимерами — подвергают сшиванию, таким образом, получая сополимеры стирола.

Рецептура модельных составов приведена в табл.2 Свойства модельных составов и методы изготовления моделей оказывают значительное влияние на качество отливок.

Модельные составы должны обладать следующими свойствами: низкой температурой плавления, минимальной усадкой при охлаждении и минимальным расширением при нагреве, хорошей жидкотекучестью в расплавленной состоянии, минимальным временем затвердевания в пресс-форме, достаточной прочностью и твердостью, отсутствием химического взаимодействия с материалами пресс-формы и обмазки, хорошей смачиваемостью обмазки, дешевизной, не дефицитностью и др.

За последние годы было опробовано большое количество различных модельных составов и различных вариантов технологического процесса изготовления моделей.

Табл. 1. Исходные материалы для модельных составов

Наименование	t _{плавления} С°	плотность кг\м ³	линейная усадка %	прочность при растяжении, кг\см ²
парафин	50...54	0.9...0.95	0.3...0.5	4...5
стеарин	52...56	0.9...0.97	0.7...2.0	4...6
этилцеллюлоза	160...180	1.0...1.2	-	140
церезин	60...100	0.91...0.94	0.6...3.5	-
буроуг. воск	82...90	1.00...1.03	-	-
канифоль	54...67	1.00...1.2	-	-
полистирол	200...280	1.05...1.07	0.2...0.8	380...600
карбамид	130...134	-	-	-
полиэтилен	104...115	0.92...0.95	1...3	100...170

Табл. 2. Рецептатура модельных составов вес указан в %

Наименование	ПС 50-50	ПСЭ 65-25-10	ПЖк 50-50	ПЖкБ 40-40-20	КПсЦ 50-30-20	КоЕк 50-30-20	МАИ 500	РЗ	МВС - 3А
парафин	50	25	50	40	-	-	-	58	60
стеарин	50	65	-	-	-	-	-	-	-
жирные кислоты	-	-	50	40	-	-	-	-	-
этилцеллюлоза	-	10	-	-	-	-	-	-	-
церезин	-	-	-	-	20	-	14	25	25
буроугольный воск	-	-	-	20	-	-	-	12	3
канифоль	-	-	-	-	50	-	82	-	-
полистерол	-	-	-	-	30	-	-	-	-
карбонид	-	-	-	-	-	98	-	-	-
борная кислота	-	-	-	-	-	2	-	-	-
полиэтилен	-	-	-	-	-	-	2	-	12
пек	-	-	-	-	-	-	1,7	-	-
торфяной воск	-	-	-	-	-	-	0,3	-	-
кубовый остаток термического крекига парафина	-	-	-	-	-	-	-	5	-

Модельные составы ПС легко готовятся, хорошо смачиваются суспензией на этилсиликате, имеют невысокую температуру плавления, гладкую поверхность, пригодны для многократного использования. Возврат модельного состава ПС равен 90...98%. Недостатки - низкая температура размягчения, значительная усадка, низкие прочность и твердость. Модельные составы типа ПС применяют как в жидком состоянии, так и в виде пасты с замешанным в нее воздухом в количестве 8...10%. При заполнении полости формы под давлением воздух сжимается, а после снятия давления воздух расширяется и уменьшает усадку модели. Но прочность моделей из пасты снижается в 1,3...1,5 раз, а поверхность получается более шероховатой, чем у моделей жидкого состава. Небольшие добавки этилоциллолозы, полиэтилена, канифоли, буроугольного воска позволяют повысить температуру размягчения, повысить прочность модельных составов из ПС. Стеарин из-за дефицитности заменяется жирными кислотами.

КПсЦ по сравнению с ПС обладает высокой механической прочностью, повышенной твердостью, лучшей теплостойкостью, и мало изменяющимся коэффициентом линейной усадки. Модели из КПсЦ имеют наиболее гладкую поверхность, хорошо смачиваемую суспензией. Недостатки КПсЦ: высокая температура плавления, сложность приготовления, огнеопасность, низкая жидкотекучесть и высокая вязкость. Из-за высокой вязкости КПсЦ плохо выплавляется из керамической формы, и использование возврата модельного состава равно 30...40%. Остальная часть модельного состава выжигается при прокаливании. Из-за низкой жидкотекучести состав КПсЦ требует повышенного давления запрессовки 8...10 кгс/см².

При выплавке из-за низкой теплопроводности модели из КПсЦ, расширяясь, длительное время действуют на оболочку с растягивающими усилиями. Для повышения прочности оболочки необходимо применять дорогой и трудоемкий способ формовки с жидким наполнителем.

Модельные и стержневые составы на основе карбамида (техническая мочевины) растворимы в воде и применяются для получения отливок высокой точности. Модели из сплавов на основе карбамида обладают повышенной прочностью и теплостойкостью, высокой размерной точностью, имеют твердую и гладкую поверхность. При растворении моделей горячей водой исключается деформация керамической формы. К недостаткам модельного состава относятся: плохая припаяемость, гигроскопичность и неприятный запах. Для уменьшения гигроскопичности к карбамиду добавляют нитрат калия (состав МОНк-10).

Для того, чтобы не допустить дефекты, связанные с неправильно подобранной модельной композицией, необходимо проанализировать требования имеющихся моделей к температуре плавления, теплостойкости, зольности, пределу прочности и выбрать модельный состав исходя из этих требований.

2. Дефекты, возникающие из-за оборудования для приготовления модельной массы и для запрессовки/заливки в пресс-формы

Оборудование, используемое при приготовлении пастообразных модельных составов, например, шестеренный смеситель замешивает в пасту от 8 до 12 % воздуха, что является положительным явлением, поскольку наполненность воздухом (рис. 3) снижает усадку, но при длительном хранении пузырьки воздуха под давлением начинают расширяться и выходить на поверхность. При запрессовке пасты в пресс-форму, необходимо установить определенный режим давления в шприце. При повышенном давлении образуется турбулентный поток модельной массы, который захватывает воздух в большем объеме, чем необходимо и образуются крупные полости (рис. 4). Для того, чтобы подобных явлений не происходило необходимо регулировать давление в сети, снизить скорость заполнения пресс-форм следить, чтобы шприц не перегревался.

3. Дефекты, возникающие из-за недостаточной точности, несоответствия требованиям пресс-форм

Требования к пресс-формам. Пресс-форма - это инструмент для изготовления модели. От точности модели зависит точность размеров полости формы и соответственно размеров отливки. Поэтому главное требование к пресс-форме заключается в том, чтобы в ней можно было получить модели отливки с заданной точностью размеров и шероховатостью поверхности.



Рис. 3. Пористая структура модели



Рис. 4. Крупная полость



Рис. 5. Неравномерность распределения и размеров включений воздуха

Точность размеров модели и качество воспроизведения ее конфигурации зависят от точности размеров полости пресс-формы и ее конструкции; чем меньше разъемов имеет пресс-форма, тем выше точность моделей. Поэтому всегда стремятся делать минимальное число разъемов. Однако для получения сложных моделей приходится делать несколько разъемов, чтобы модель можно было извлечь из пресс-формы.

Для хорошего заполнения полости пресс-формы модельным составом она должна иметь соответствующую литниковую систему, а для удаления воздуха из полости пресс-формы при заполнении ее модельным составом - вентиляционную систему.

Конструкция пресс-формы должна быть такой, чтобы модель можно было легко и быстро, без деформаций и повреждений извлечь из рабочей полости пресс-формы.

Большинство модельных составов имеют низкую теплопроводность, а поэтому медленно охлаждаются в пресс-форме. Пресс-форма должна обеспечить достаточную скорость охлаждения. Это достигается устройством в ней системы охлаждения водой или другими теплоносителями. Такие пресс-формы часто используют в массовом производстве, где важно обеспечить высокую производительность оборудования. Для получения по одной пресс-форме достаточного количества качественных моделей она должна обладать необходимой долговечностью. Наконец, пресс-форма должна иметь такую конструкцию, чтобы ее можно было просто и быстро изготовить, а материалы для нее были не дефицитными по конструкции и методам изготовления обычно различают пресс-формы для единичного и мелкосерийного, серийного и массового производства.

Пресс-формы со временем имеют свойство изнашиваться. Необходимо корректировать пресс-формы для того, чтобы модель не меняла необходимую геометрическую форму. Пресс-форма должна иметь определенную температуру, быть смазана и продута от остатков модельной массы.

4. Дефекты, возникающие из-за неправильного подвода модельной массы в пресс-форму

При изготовлении крупногабаритных, сложных по форме и разностенных отливок большое влияние на точность и конфигурацию оказывает место модели в пресс – форме и подвод массы к модели. При изготовлении крупногабаритных отливок, имеющих форму тел вращения, необходимо, по возможности, подводить модельный состав в центр модели. Для моделей, имеющих форму втулок, где подвод в центр невозможен, необходимо выполнять подвод в несколько точек (не менее трех) симметрично. Те части деталей, которые должны иметь точные размеры, необходимо располагать в одной половине пресс – форм с тем, чтобы на этих размерах не сказывалось влияние плоскости разъема [3].

5. Дефекты, возникающие из-за несоблюдения технологического режима (время выдержки перед нанесением первого слоя суспензии, повышенный нагрев модельной массы, перегрев шприца или пресс-формы)

При повышенном нагреве пасты или шприца возникает местная усадка. Модели имеют свойство усаживаться (изменять свои размеры) в течение некоторого времени после извлечения из пресс – формы, поэтому необходимо выдержать не менее 1 часа перед нанесением суспензии. Переохлаждение пресс – формы, комковатость массы и недостаточное давление на пасту могут являться причиной невыполнения формы моделей.

6. Дефекты литейного характера (недоливы, неспай)

Недолив и неспай моделей появляются тогда, когда температура пасты низкая и давление запрессовки недостаточное. Также подобные дефекты наблюдаются тогда, когда запрессовывается недостаточное количество массы, пресс – форма негерметично закрыта, если неправильно осуществлен подвод массы к модели.

Для устранения подобных дефектов необходимо предусмотреть надежные зажимы для герметизации пресс – форм, следить за количеством модельной массы, обеспечить правильный подвод модельной массы. Если эти меры не устраняют недолив и неспай необходимо повысить температуру пасты или увеличить давление в шприце [4].

7. Дефекты, возникающие из-за «человеческого фактора» (недостаточная очистка полости пресс-формы перед заполнением, при наличии дополнительных элементов пресс-форм отсутствие их на момент заполнения пресс-формы и т.д.)

Человеческий фактор присутствует везде, где есть человек. Если, например, недостаточно продуть пресс – форму от капелек воды получают дефекты поверхности, изображенные на рис. 6.

В заключение можно сделать вывод, что все дефекты взаимосвязаны. При устранении какой-либо из возможных причин необходимо наблюдать за изменениями параметров остальных возможных причин. Необходимо следить за появлением новинок на рынке модельных составов и оборудования для их приготовления и запрессовки, и, основываясь на техническом прогрессе, модернизировать имеющееся оборудование или приобретать новое.



Рис. 6. Дефекты поверхности

Литература

1. Гини Э.Ч., Зарубин А.М., Рыбкин В.А. Специальные технологии литья. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2010. -367 с.
2. Лунев А.А. Точное литье в серийном производстве. // Труды конференции. - 1955, с. 25-29.
3. Лакедемонский А.В. Дефекты отливок и меры их предупреждения. – М.: Машгиз, 1962.
4. Курчман Б.С. Точное литье по выплавляемым моделям. – М.: Оборонгиз, 1958.
5. Книпп Эрвин. Пороки отливок.// Перевод с немецкого. – М.: Машгиз, - 1958.
6. Репах С.И. Влияние параметров производства на размерную точность выплавляемых моделей отливок. //Литейное производство. - 2009. - №7. - С.34-36
7. Репах С.И. О механизме образования утяжин в выплавляемых моделях // Литейное производство. - 2009. - №5. - С. 37-40.

Секция №6
Оборудование и технологии обработки
давлением

УДК 621.7

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ТИТАНОВЫХ КОЛЕЦ

Артем Игоревич Алимов

*Аспирант 1 года обучения,
кафедра «Технологии обработки давлением»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: С.А. Евсюков,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии обработки
давлением»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Одними из важнейших деталей в двигателестроении являются кольца газотурбинных двигателей (ГТД), служащие, в основном, соединительными элементами. Кольца ГТД являются особо ответственными деталями, т.к. выход хотя бы одного кольца из строя может привести к поломке всего двигателя, т.е. аварийной ситуации. Поэтому к кольцевым деталям авиационных ГТД, работающих в условиях высоких температур и динамических нагрузок, предъявляются высокие требования к структуре и уровню показателей механических свойств.

Наиболее распространенным материалом для изготовления колец ГТД является двухфазный титановый деформируемый сплав ВТ-6 (Ti-6Al-4V), который обладает высокими прочностными и жаропрочными свойствами, высокой коррозионной стойкостью и хорошей технологичностью.

Деталь «Кольцо» (рис. 1) используется для бандажирования сиффона ракетного двигателя РД-171, поэтому к ней предъявляются повышенные требования по механическим, структурным и физическим свойствам. Характер структуры сплава ВТ-6 формируется в процессе деформации и не поддается исправлению термической обработкой. В свою очередь, исходная структура определяет показатели механических свойств. Таким образом, оптимальная микроструктура деталей ракетного двигателя и, в частности, детали «Кольцо», является важным требованием.

Для устранения недостатков, присущих традиционному технологическому процессу получения крупногабаритных титановых колец методомковки на молотах, был предложен новый технологический процесс, состоящий из закрытой штамповки на КГШП, удаления перемычки и последующей горячей радиальной раскатки.



Рис. 1. 3D-модель детали
«Кольцо»

Описание базовой технологии изготовления детали «Кольцо»

Базовый технологический процесс изготовления детали «Кольцо» включает в себя следующие операции:

1. Нагрев мерных заготовок (пруток ВТ6 ГОСТ 26492-85) до температуры началаковки в камерной печи;

2. Осадка на молоте с МПЧ 3,15 т;
3. Прошивка отверстия на молоте с МПЧ 3,15 т;
4. Подогрев заготовки до температурыковки;
5. Раскатка на оправке кольцевой заготовки до конечного наружного диаметра на молоте с МПЧ 2 т. Если в процессе раскатки температура заготовки выходит из ковочного интервала, выполняют подогрев до температурыковки.

После раскатки поковка разрезается на ленточнопильном станке пополам и используется для изготовления двух деталей. Коэффициент использования металла в данном технологическом процессе составляет 11,9%.

Недостатками данной технологии являются:

- а. повышенные припуски на механическую обработку;
- б. высокие скорости деформации при ковке и раскатке на молоте, что приводит к снижению пластичности и получению неоднородной микроструктуры;
- в. неравномерность деформации, что приводит к нестабильности механических свойств;
- г. длительность обработки из-за большого количества ударов, что приводит к остыванию заготовки, снижению пластических свойств и получению неоднородной микроструктуры;
- д. необходимость последующего разрезания заготовки, что увеличивает время обработки, повышает расход металла (расход на стружку);
- е. технологический цикл осуществляется за 4 нагрева (нагрев перед ковкой, нагрев перед раскаткой и 2 подогрева в процессе раскатки), что повышает время обработки, снижает пластичность изделий за счет образования альфированного слоя и повышает затраты на оборудование и рабочих.

Для исследования существующего технологического процесса и создания нового использовался современный метод исследования с помощью метода конечных элементов.

Методика моделирования и принятые допущения

Моделирование проводилось в программном комплексе Deform 3D.

В качестве материала заготовки использовался материал Ti-6Al-4V из стандартной базы данных.

При моделировании принимались следующие допущения:

1. Заготовку и инструменты считаем сплошными, однородными и изотропными телами;
2. Модель деформируемого тела жестко-пластическая с нелинейным упрочнением;
3. Инструмент считаем жестким телом;

Начальный размер зерна задавался равным 15 мкм согласно ГОСТ 26492-85.

Исходная структура заготовок – ламеллярная.

Используемая математическая модель – глобуляризации титанового сплава VT6 по Джонсону-Мейлу-Аврами-Колмогорову.

Кинетика формирования глобулярной структуры:

$$X_{REX} = 1 - \exp \left[-\beta_d \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{0.5}} \right)^{k_d} \right], \quad \text{где} \quad \varepsilon_{0.5} = a_5 \dot{\varepsilon}^{m_5}$$

где $\varepsilon_{0.5}$ обозначает деформацию при 50% рекристаллизации.

Уравнение, определяющее средний размер глобулярного зерна:

$$d_{REX} = a_8 \varepsilon^{n_8} \dot{\varepsilon}^{m_8}, \text{ если } d_{DRX} > d_0, \text{ тогда } d_{DRX} = d_0.$$

Уравнение, определяющее средний размер зерна α -фазы:

Начало глобуляризации происходит при степени деформации $\varepsilon_c = 0,5$.

Использовались коэффициенты, которые были получены в работе [1].

Исследование технологического процессаковки на молоте и раскатки на оправке

Моделирование показало, что для осадки требуется 23 удара молота. Температурное поле после осадки представлено на рис. 2. Видно, что из-за большого количества ударов и продолжительного контакта нижнего бойка с заготовкой происходит значительное остывание нижней части поковки.

Это приводит к образованию зоны затрудненной деформации вблизи нижнего бойка. Это видно на рис. 3, на котором изображено распределение накопленной деформации после осадки.

Далее проводилось исследование наметки и прошивки. В качестве критерия разрушения использовался критерий Кокрофта-Лэзема. Следует отметить, что данный критерий разрушения определяется опытным путем, но, из-за отсутствия возможности проведения опыта, было принято решение принять его равным 0,45. Эта величина определяет поверхность, по которой происходит отделение перемычки и момент начала отделения перемычки, таким образом, влияя на предсказываемое усилие.

Моделирование показало, что для наметки на половину высоты поковки требуется 4 удара, для прошивки требуется 2 удара.

Распределение температуры после прошивки показано на рис. 4. Температура очень неоднородна по сечению и, кроме того, выходит за пределы интервала штамповки, поэтому перед раскаткой необходим промежуточный подогрев.

Температурное поле перед раскаткой на оправке представлено на рис. 5.

Раскатку на оправке применяют при ковке кольцеобразных поковок путем увеличения наружного и внутреннего диаметров прошитой заготовки за счет уменьшения толщины стенки (рис. 6).

Процесс является разновидностью протяжки, так как можно представить, что концы заготовки соединены между собой в кольцо. Ковку ведут узким верхним бойком 4, располагая его длинной стороной параллельно цилиндрической оправке 2, опирающейся на боек-скобу 1 или две стойки. При этом желательно, чтобы длина бойка перекрывала длину поковки 3 (высоту кольца).

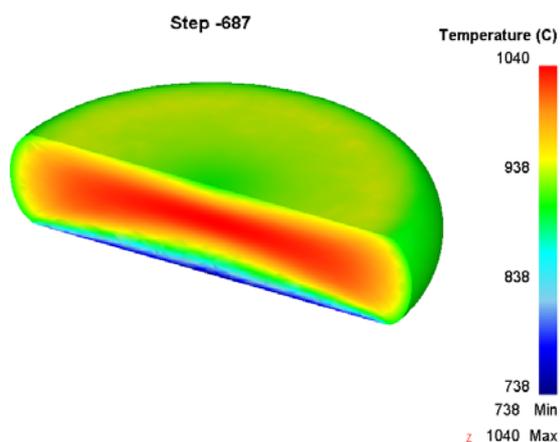


Рис. 2. Температурное поле после осадки

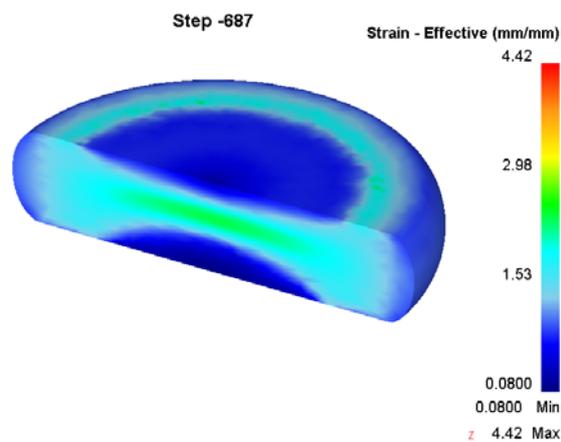


Рис. 3. Накопленные деформации после осадки

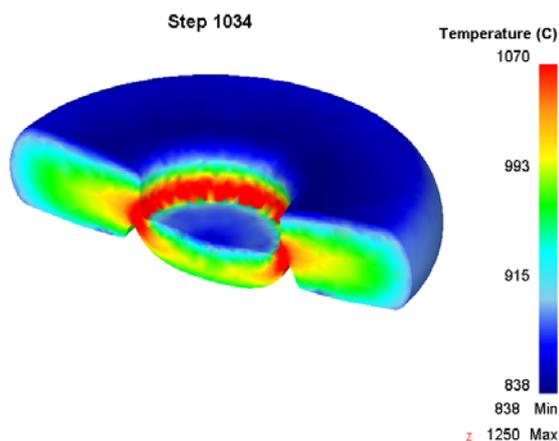


Рис. 4. Температурное поле после прошивки

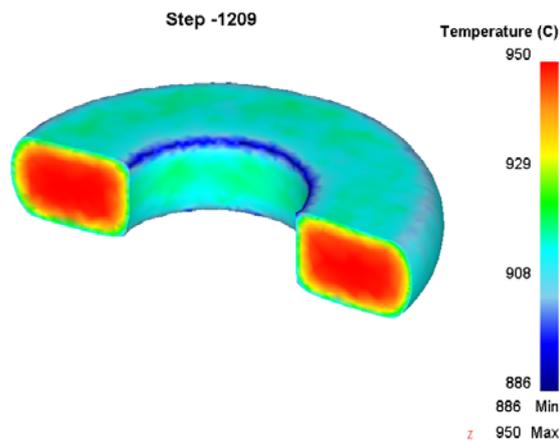


Рис. 5. Температурное поле перед раскаткой

После каждого обжатия оправку поворачивают, благодаря чему несколько поворачивается и кольцо. В результате раскатки наружный и внутренний диаметры кольца увеличиваются, а толщина стенки уменьшается. В ширину кольцо раздается незначительно.

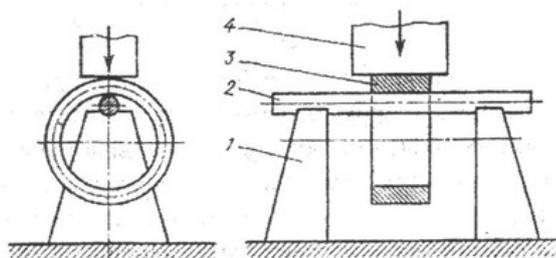


Рис. 6. Схема раскатки на оправке

Расчет показал, что для раскатки до требуемых размеров требуется 153 удара и 2 подогрева. Температурное поле после раскатки представлено на рис. 7.

В процессе раскатки сечение кольцо искажается, а также образуется утяжина (рис. 8). Величина утяжины и искажение сечения кольца будет зависеть в большей степени от квалификации кузнеца.

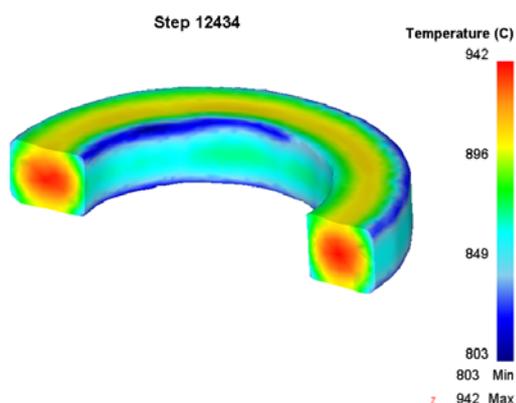


Рис. 7. Поле температур после раскатки

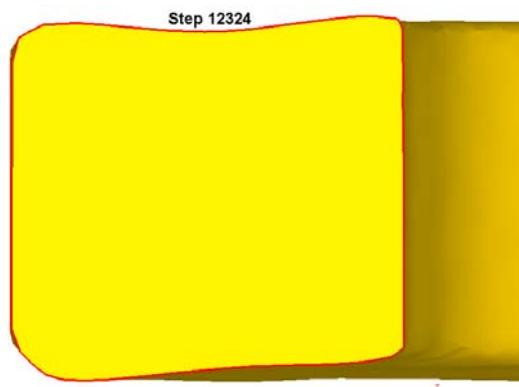


Рис. 8. Сечение кольца после раскатки на оправке

Изменение доли глобулярных зерен в структуре по переходам представлено на рис. 9. Видно, что при осадке вследствие образования зоны затрудненной деформации вблизи нижнего бойка глобуляризация в этой зоне не происходит. Из-за высокой скорости деформации степень глобуляризации после операции осадки составляет всего лишь 0,406. Во время наметки и прошивки доля глобуляризованных зерен повышается до 0,541. В процессе раскатки доля глобулярных зерен в структуре поковки повышается до 0,655. Таким образом, не весь объем поковки глобуляризуется, что влечет за собой снижение механических свойств (в первую очередь пластичности).

Изменение среднего размера зерна α -фазы по переходам представлено на рис. 10.

Так как при осадке глобуляризация в зоне затрудненной деформации не происходит, то размер зерна α -фазы в процессе деформации не изменяется. Отчетливо видно уменьшение зерна в зоне интенсивного пластического течения (так называемого «ковочного креста»). После осадки средний размер зерна α -фазы составляет 7,64 мкм. В операциях наметки и прошивки средний размер зерна α -фазы меняется незначительно из-за низкой степени деформации, после прошивки он составляет 6,41 мкм. В процессе раскатки средний размер α -фазы уменьшается до 4,60 мкм. Имеется неоднородность микроструктуры: в отдельных зонах кольца средний размер α -фазы составляет 10...12 мкм.

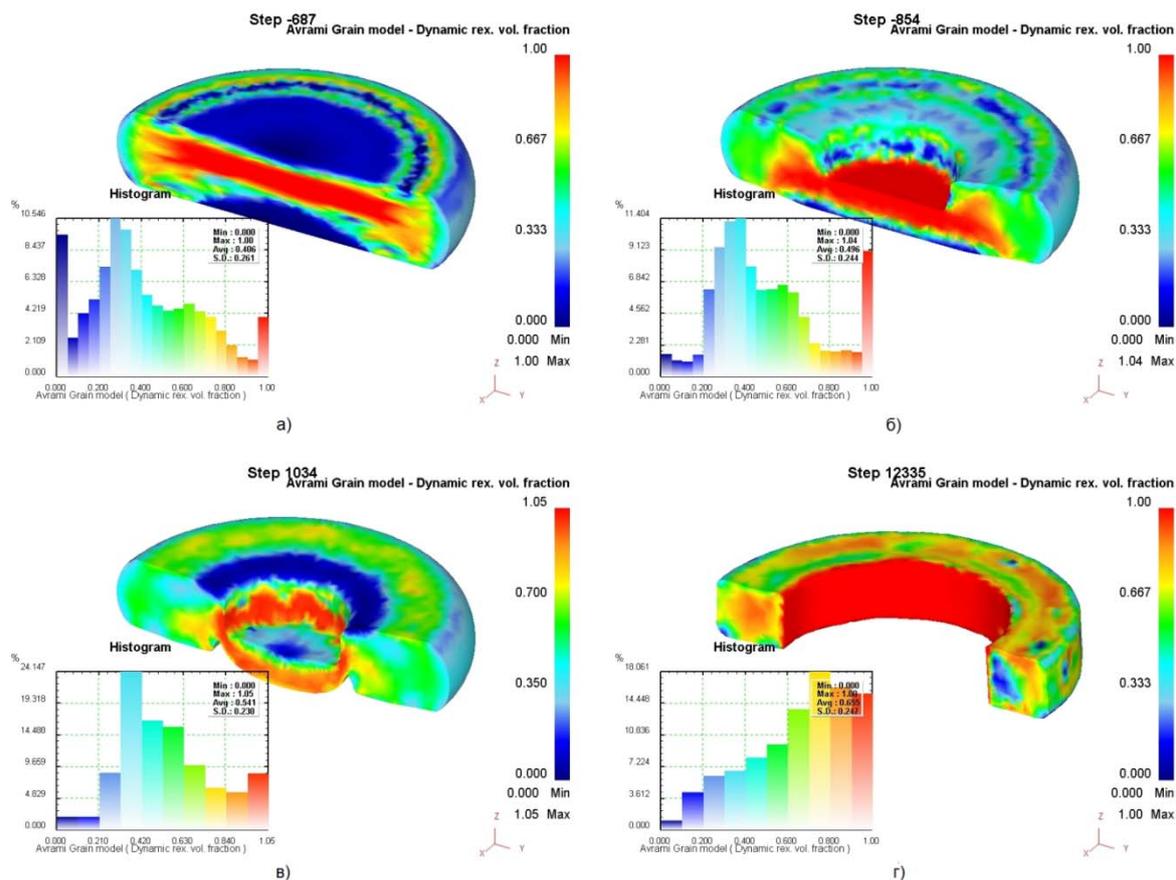


Рис. 9. Доля глобулярных зерен по сечению поковки:
а - после осадки; б - после наметки; в - после прошивки; г - после раскатки

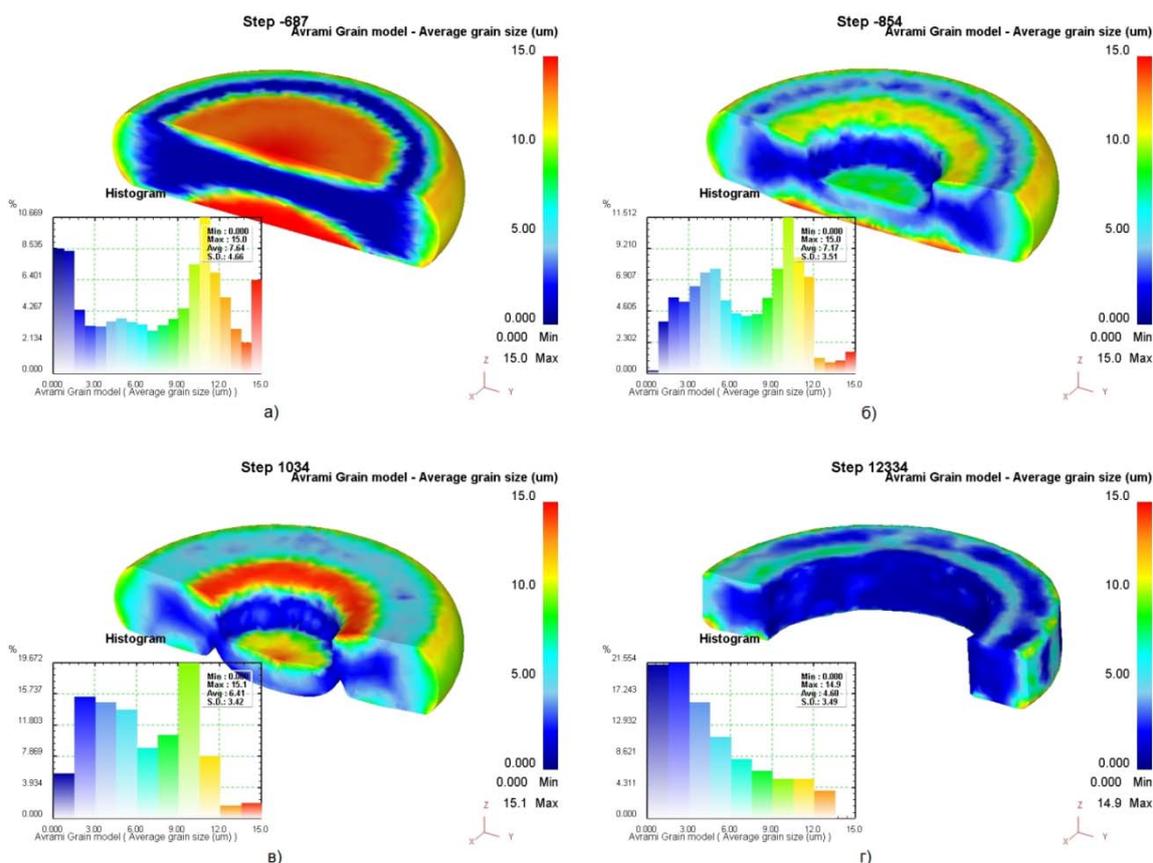


Рис. 10. Размер зерна α -фазы по сечению поковки:
а - после осадки; *б* - после наметки; *в* - после прошивки; *г* - после раскатки

Исследование технологического процесса штамповки на КГШП и раскатки на КРМ

После осадки температура поковки (рис. 11) не выходит за рамки допустимой, кроме того, она распределена более равномерно по сечению. Заметно некоторое охлаждение в тонком поверхностном слое, что не приведет к снижению свойств поковки.

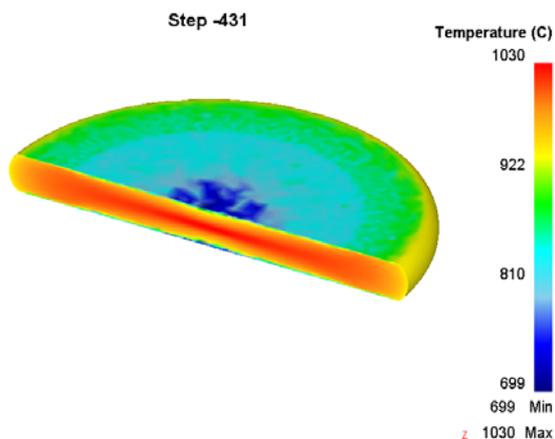


Рис. 11. Температурное поле после осадки

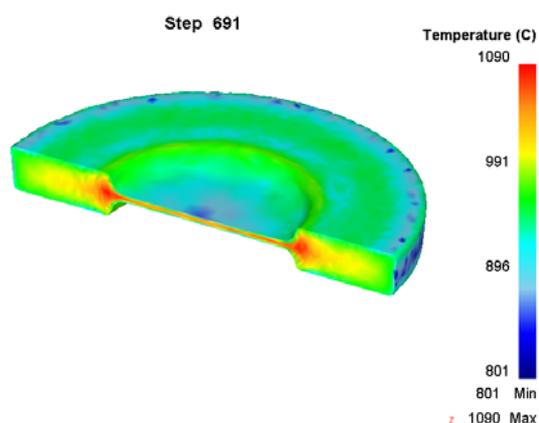


Рис. 12. Температурное поле после раскатки

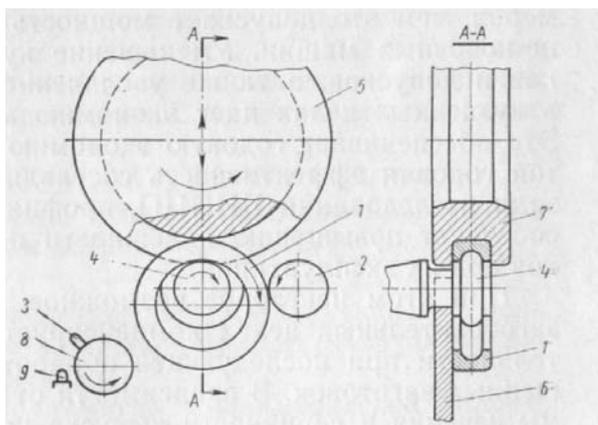


Рис. 12. Схема радиальной раскатки кольцевых заготовок:

- 1 - раскатываемая заготовка;
- 2 - опорный ролик; 3 - контрольный ролик;
- 4 - центральный раскатной валок; 5 - вращающийся нажимной валок;
- 6 - опорная планка;
- 7 - нажимной бандаж;
- 8 - отключатель; 9 - клапан

Для осадки до высоты 31,5 мм требуется усилие 13 МН, таким образом, КГШП 25 МН подходит для выполнения данной операции. Для закрытой штамповки требуется усилие 18,3 МН. Для прошивки требуется усилие 0,75 МН.

При закрытой штамповке позиционирование заготовки в матрице происходит по нижней плоскости и боковой поверхности поковки.

Температурное поле после закрытой штамповки показано на рис. 12. Температура поковки не выходит из интервала допустимой.

Далее проводилось моделирование горячей радиальной раскатки. Раскатка представляет собой технологическую операцию, посредством которой производится одновременное увеличение наружного диаметра и диаметра отверстия кольцевой поковки за счет уменьшения толщины ее стенки (рис. 13). При этом может быть изменена в желательном направлении также и форма поперечного сечения заготовки.

Т.к. очаг деформации локализован вблизи зоны контакта валков с заготовкой, то для снижения времени расчетов и повышения адекватности результатов разбиение сетки конечных элементов проводилось с заданием окна плотности в очаге деформации.

Температурное поле после раскатки показано на рис. 15. Температура в поковке после раскатки не выходит за пределы интервала штамповки для сплава ВТ6, температура несколько ниже допустимой оказывается только в тонком заусенце, который будет удален при механической обработке и это не повлияет на механические свойства конечной детали.

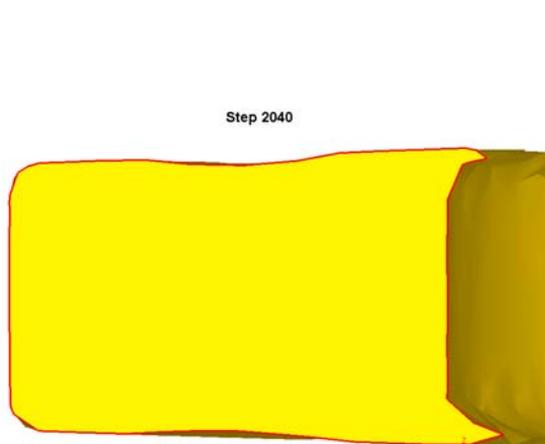


Рис. 13. Сечение кольца после раскатки

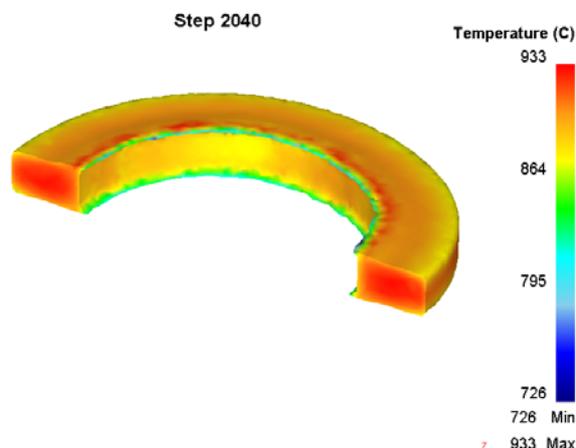


Рис. 14. Поле температур после раскатки

Для раскатки требуется усилие 185 кН, то есть усилия кольцераскатного автомата в 300 кН достаточно для выполнения данной операции.

В процессе раскатки образуется утяжина (рис. 14), но она не выходит за пределы допуска по высоте поковки. Также образуется заусенец на внутренней цилиндрической поверхности кольца. Этого можно избежать, если использовать закрытый калибр. Форма получаемого сечения кольца предсказуема и не зависит от квалификации кузнеца, так как процесс раскатки происходит автоматически.

Изменение доли глобулярных зерен в структуре по переходам представлено на рис. 16.

При осадке на КГШП вследствие высокой степени деформации ($\sim 0,81$) и умеренной скорости деформации глобуляризация проходит почти полностью, после осадки доля глобулярных зерен по сечению составляет 0,736. Однако на торцах кольца из-за трения и, вследствие этого, затрудненного течения, имеются зоны, не полностью глобуляризовавшиеся. Кроме того, боковая поверхность кольца также глобуляризуется не полностью. В процессе закрытой штамповки зоны затрудненной деформации получают достаточную деформацию для того, чтобы структура полностью превратилась из ламеллярной в глобулярную. В процессе раскатки на кольцераскатной машине боковая поверхность кольца достаточно прорабатывается.

После раскатки доля глобулярных зерен составляет 0,948. Таким образом, в процессе данного технологического процесса глобуляризуется практически весь объем поковки, что повышает механические свойства (в частности, пластичность). Кроме того, высокая степень деформации снижает анизотропию сплава ВТ6.

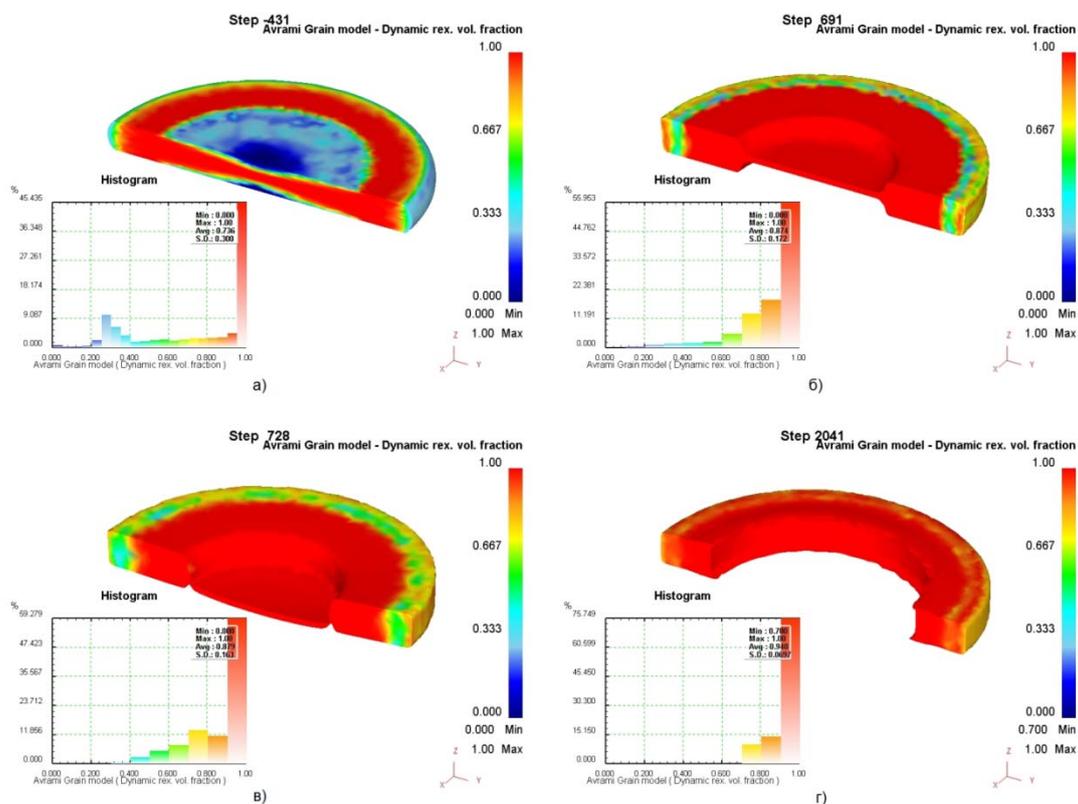


Рис. 15. Доля глобулярных зерен по сечению поковки:
a - после осадки; *б* - после закрытой штамповки; *в* - после прошивки; *г* - после раскатки

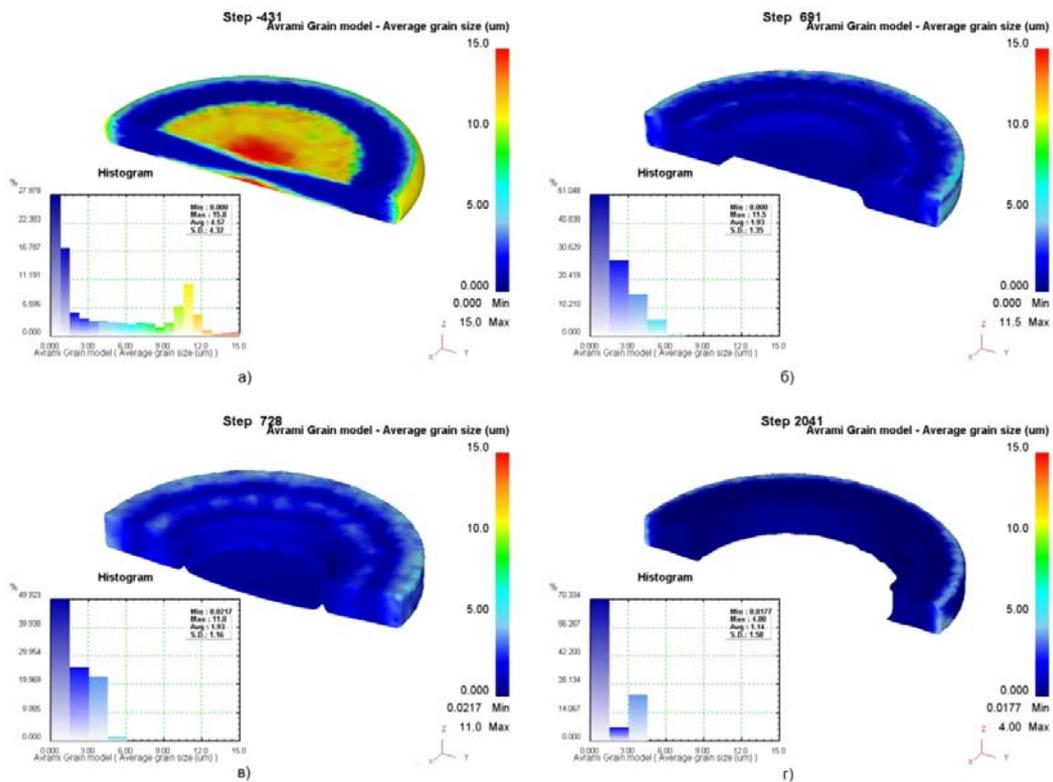


Рис. 16. Размер зерна α -фазы по сечению поковки:
 а - после осадки; б - после закрытой штамповки; в - после прошивки; г - после раскатки

Изменение среднего размера зерна α -фазы по переходам представлено на рис. 17.

Наиболее интенсивное уменьшение среднего размера зерна α -фазы происходит в процессе осадки на КГШП (до 4,57 мкм) и закрытой штамповки на КГШП (до 1,93 мкм). После раскатки на кольцераскатной машине образуется мелкозернистая однородная структура со средним размером зерна α -фазы 1,14 мкм.

Наиболее полно (см. рис. 17) происходит в технологических операциях, в процессе которых поковка получает наибольшую деформацию, в данном случае, осадке и закрытой штамповке. При высоких скоростях деформирования титановые сплавы имеют низкую пластичность. При скоростях деформирования, характерных для КГШП и ниже, многие титановые сплавы имеют хорошую пластичность и позволяют деформировать их со степенью деформации до 0,9.

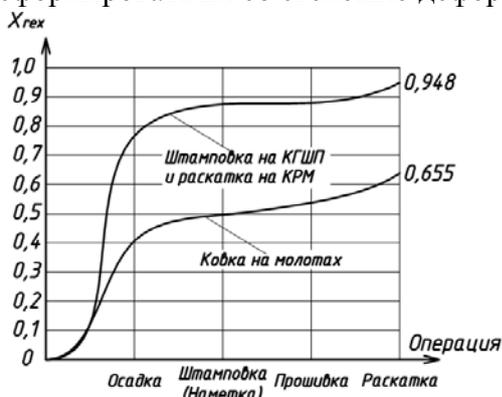


Рис. 17. Сравнительный график изменения объемной доли глобулярной структуры

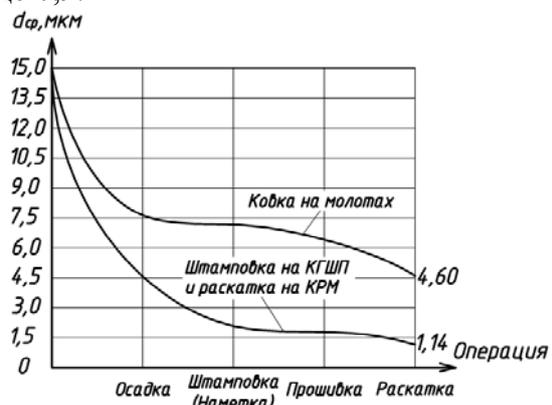


Рис. 18. Сравнительный график изменения среднего размера зерна α -фазы

Из рис. 18 видно, что после штамповки на КГШП и раскатке на КРМ получается мелкозернистая однородная микроструктура, которая способствует повышению пластичности, ударной вязкости, прочности.

К сожалению, в данное время не существует математических моделей динамической, статической и метадинамической рекристаллизации многих сплавов, в том числе титановых, а также стандартных методик для их получения. Кроме того, кривые упрочнения многих сплавов содержат узкий диапазон температур, степеней деформации и скоростей деформации и получаются авторами по разным методикам. Это не позволяет проводить комплексные исследования технологических процессов с целью повышения качества и долговечности получаемых поковок и разрабатывать процессы получения новых деталей.

Выводы

1. Технологический процессковки на молоте и раскатки на оправке осуществляется за 182 удара.
2. При осадке на молоте происходит значительное остывание нижней части поковки, что приводит к увеличению застойной зоны и неравномерности деформации.
3. Большое количество нагревов при ковке на молотах приводит к увеличению альфированного слоя и снижению пластичности.
4. Высокая скорость деформации при ковке на молотах приводит к снижению пластичности.
5. Процесс закрытой штамповки на КГШП и раскатки на КРМ можно осуществлять за один нагрев.
6. В процессе раскатки на КРМ образуется незначительная утяжина.
7. В процессе раскатки на КРМ образуется заусенец, который может привести к трудностям при дальнейшей механической обработке.
8. Форма получаемого сечения кольца после раскатки на КРМ предсказуема и не зависит от квалификации кузнеца, так как процесс раскатки происходит автоматически.
9. Высокая степень деформации при закрытой штамповке на КГШП и раскатке на КРМ снижает анизотропию материала и повышает механические свойства.
10. При раскатке на оправке происходит искажение сечения кольца, которое зависит в большей степени от квалификации кузнеца.
11. Штамповка на КГШП с последующей раскаткой обеспечивает мелкозернистую однородную микроструктуру, объемная доля глобулярной структуры после обработки равна 0,948, что обеспечивает высокие механические свойства.
12. В процессековки и раскатки на молотах глобуляризация не проходит полностью, кроме того, образуется неоднородная микроструктура.

Литература

1. *N. V. Lopatin, O. N. Maradudina, and G. S. D'yakov.* "Analysis of the Structure Formation and Properties of the VT6 Alloy during Upsetting of the Symmetrically Truncated Conical Billets", Russian Journal of Non Ferrous Metals, 2011, Vol. 52, No. 1, 33–38.
2. *Чечулин Б.Б., Ушаков С.С.* Титановые сплавы в машиностроении, Л., «Машиностроение» (Ленингр. отделение), 1977. – 248с.
3. *А. И. Спришевский* Подшипники качения. - М.: Машиностроение, 1968. – 632 с
4. *Сторожев М.В.* (ред.) Ковка и объемная штамповка стали. Справочник в 2-х томах, том. 2, М., «Машиностроение», 1967. – 448с.
5. Ковка и штамповка. Справочник. В 4-х т. – Т.2. Горячая штамповка / Под ред. Е.И.Семенова / - М.: Машиностроение, – 1986, 592с.

АВТОМАТИЧЕСКИЕ ДВУХКЛЕТЬЕВЫЕ КОВОЧНЫЕ ВАЛЬЦЫ

Григорий Дмитриевич Григоренко

Студент 5 курса,

кафедра «Технологии обработки давлением»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Езжев А.С.,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии обработки давлением»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Ковочные вальцы широко применяются при изготовлении заготовок различных деталей. Вальцовка применяется с целью приближения формы заготовки к форме готовой детали, что дает значительную экономию металла при последующей штамповке. В настоящей статье рассмотрены вопросы технологии изготовления заготовок и конструкции автоматических вальцев, встраиваемых в автоматическую линию.

Вальцы предназначены для изготовления гаечного ключа 14х17.

На рис. 1 показан чертеж гаечного ключа.

В программном комплексе QForm был смоделирован процесс вальцовки детали на первом, втором переходе и окончательной штамповки. На рис. 2 показаны форма заготовки после первого и второго перехода. Полученные технологические параметры (сила, форма, размеры) использованы в качестве исходных для разработки автоматических ковочных вальцев.

Чертеж детали.

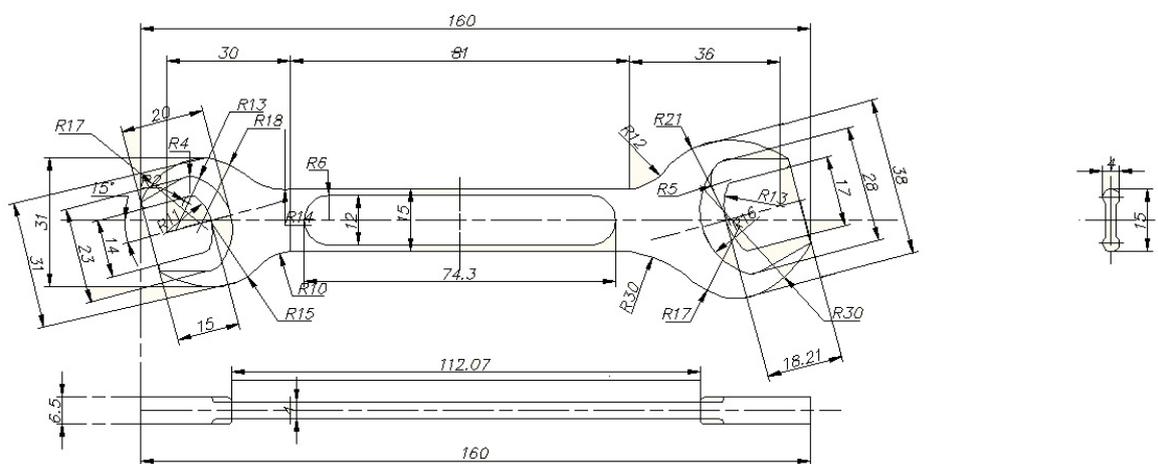


Рис. 1. Чертеж гаечного ключа

По полученным размерам заготовки определяем характеристики привода.

$L=118$ мм – длина заготовки.

$D=22$ мм – диаметр заготовки.

$h_1=11$ мм – высота провальцованной заготовки.

$b_1=27$ мм – ширина провальцованной заготовки.

$D_0=210$ мм – диаметр валков.

$\mu=0.6$ – коэффициент трения.

$n=15$ об/мин – количество оборотов валков в минуту.

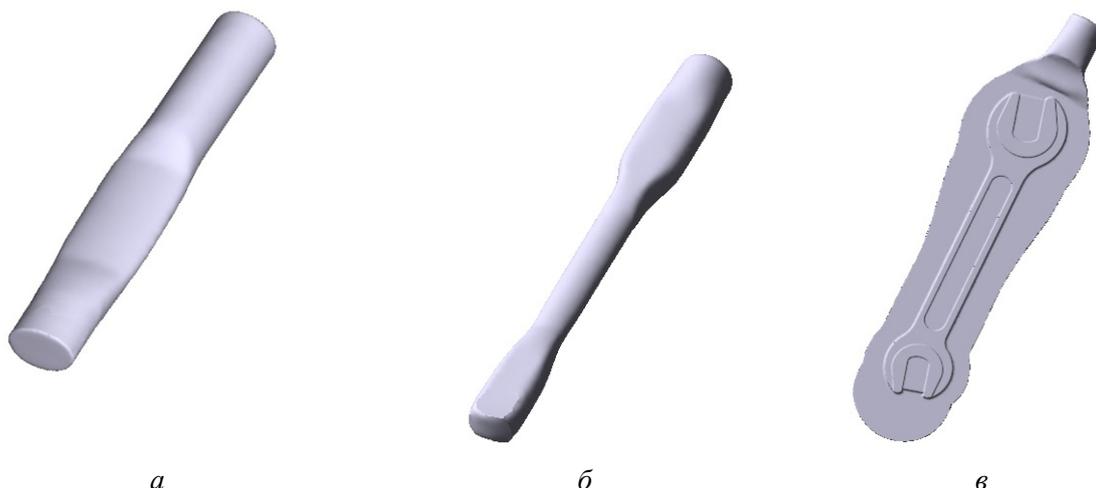


Рис. 2. Моделирование техпроцесса штамповки гаечного ключа в QForm 3D:
a — первый переход вальцовки; *б* — второй переход вальцовки;
в — окончательная штамповка

Найдем величину угла захвата заготовки валками:

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \sqrt{\frac{\Delta h}{4 \cdot R_p}}$$

$$\Delta h = D - h_1 = 22 - 10 = 12 \text{ мм}$$

$$R_p = \frac{1}{2} \cdot (D_0 - h_1) = \frac{1}{2} \cdot (210 - 10) = 100 \text{ мм}$$

$$\alpha = \left(\arcsin \sqrt{\frac{12}{4 \cdot 100}} \right) \cdot 2 = 20^\circ$$

Длина очага деформации:

$$l = \sqrt{\Delta h \cdot R_p} = \sqrt{12 \cdot 100} = 34,6 \text{ мм}$$

Предельное абсолютное обжатие:

$$\Delta h_{\max} = 4 \cdot R_p \cdot \sin^2 \frac{\alpha_{\max}}{2} = 4 \cdot R_p \cdot \left(\frac{1 - \cos \alpha_{\max}}{2} \right)$$

Принимая предельно допустимый угол захвата $\alpha_{\max} = 33^\circ \dots 35^\circ$ получим:

$$\Delta h_{\max} = 4 \cdot 100 \cdot \left(\frac{1 - \cos(34^\circ)}{2} \right) = 34 \text{ мм}$$

Определим опережение металла при вальцовке:

$$S = \gamma^2 \cdot \frac{R_p}{h_1} \cdot 100\%$$

γ — критический угол, делящий очаг деформации на зоны отставания и опережения.

$$\gamma = q \cdot \frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{2 \cdot \mu} \right)$$

q — коэффициент, учитывающий неравномерность деформации металла.

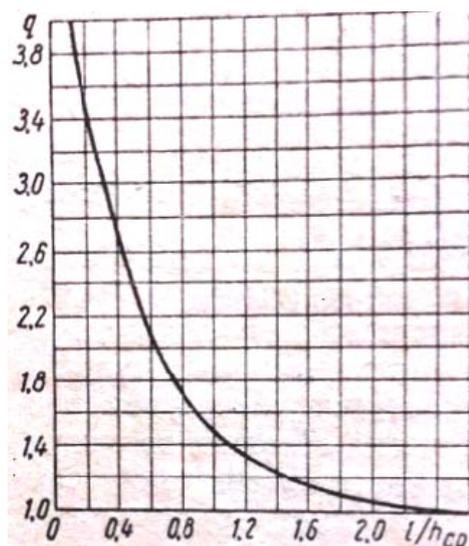


Рис. 3. График, для определения
неравномерность деформации металла

$$h_{cp} = \frac{1}{2} \cdot (D + h_1) = \frac{1}{2} \cdot (22 + 10) = 16 \text{ мм.}$$

$$\frac{l}{h_{cp}} = \frac{36,4}{16} = 2,27 \rightarrow q = 1$$

$$\gamma = 1 \cdot \frac{0,25}{2} \left(1 - \frac{0,25}{2 \cdot 0,6} \right) = 0,1$$

Окончательно получим:

$$S = 0,1^2 \cdot \frac{100}{10} \cdot 100\% = 10\%$$

Определим номинальную силу, действующую на заготовку:

При первом проходе.

$$b_{cp} = \frac{1}{2} \cdot (D + b_1) = \frac{1}{2} \cdot (22 + 27) = 24,5 \text{ мм} - \text{средняя ширина}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{D} = \frac{12}{22} = 0,54 \text{ степень деформации}$$

Скорость деформации:

$$\varepsilon_d = 0,105 \cdot n \cdot \sqrt{\varepsilon \cdot \frac{R_p}{D}} = 0,105 \cdot 15 \cdot \sqrt{0,54 \cdot \frac{100}{22}} = 2,41 / \text{сек}$$

При температуре 1200^0 и скорости деформации 2,4 1/сек $\sigma_s = 50 \text{ МПа}$

Удельное давление при вальцовке можно определить по формуле:

$$p = 1,08 \cdot \sigma_s \cdot n_\sigma = 1,08 \cdot 50 \cdot (2,5 \dots 3) = 135 \dots 162 \text{ МПа}$$

Усилие при вальцовке:

$$P = p \cdot b_{cp} \cdot l = 148,5 \cdot 24,5 \cdot 36,4 = 132,5 \text{ кН}$$

При вальцовке без заусенца $\varphi = 0,42$

Момент при вальцовке:

$$M = 2 \cdot P \cdot l \cdot \varphi = 2 \cdot 132,5 \cdot 0,0364 \cdot 0,42 = 4,05 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

При втором проходе.

Предельные размеры заготовки после 2-го прохода:

$h_1 = 10 \text{ мм}$ — высота заготовки;

$b_{1c} = 15 \text{ мм}$ — ширина заготовки;

$$\Delta h = b_1 - h_1 = 27 - 10 = 17 \text{ мм}$$

$$l = \sqrt{\Delta h \cdot R_p} = \sqrt{16 \cdot 100} = 41,2 \text{ мм.}$$

$$b_{cp} = \frac{1}{2} \cdot (10 + 15) = 12,5 \text{ мм — средняя ширина}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{b_1} = \frac{16}{27} = 0,6 \text{ — степень деформации}$$

Скорость деформации:

$$\varepsilon_{\dot{\sigma}} = 0,105 \cdot n \cdot \sqrt{\varepsilon \cdot \frac{R_p}{D}} = 0,105 \cdot 15 \cdot \sqrt{0,6 \cdot \frac{100}{27}} = 2,34 \text{ 1/сек}$$

При температуре 1200° и скорости деформации 2,4 1/сек $\sigma_s = 50 \text{ МПа}$

Удельное давление при вальцовке можно определить по формуле:

$$p = 1,08 \cdot \sigma_s \cdot n_{\sigma} = 1,08 \cdot 50 \cdot (2,5 \dots 3) = 135 \dots 162 \text{ МПа}$$

Усилие при вальцовке:

$$P = p \cdot b_{cp} \cdot l = 148,5 \cdot 12,5 \cdot 41,2 = 74,47 \text{ кН}$$

При вальцовке без заусенца $\varphi = 0,42$

Момент при вальцовке:

Техническая характеристика ковочных вальцев:

1. Число клетей, шт. 2
2. Номинальная сила, кН. 130
3. Число оборотов валков, об/мин. 15
4. Наружный диаметр валков, мм. 200
5. Расстояние между осями валков, мм. 210
6. Расстояние между клетями валков, мм
 - минимальное 480
 - максимальное. 5
7. Мощность привода, кВт. 11

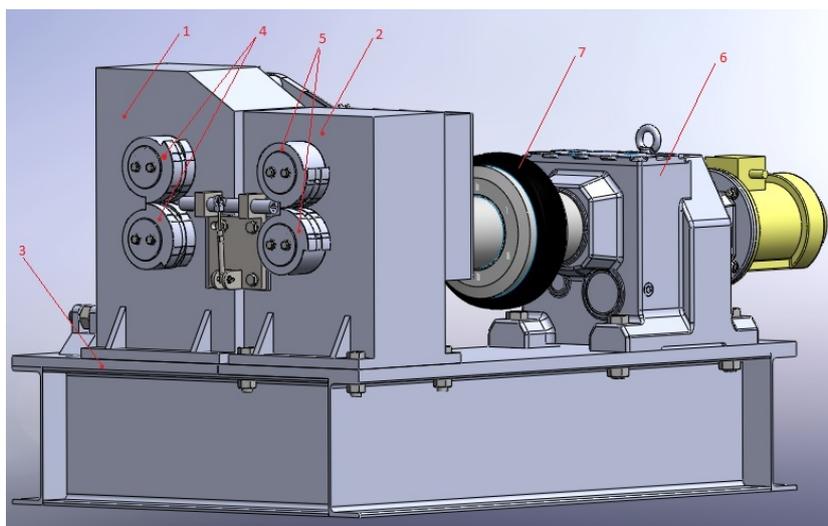


Рис. 4. Общий вид ковочных вальцев

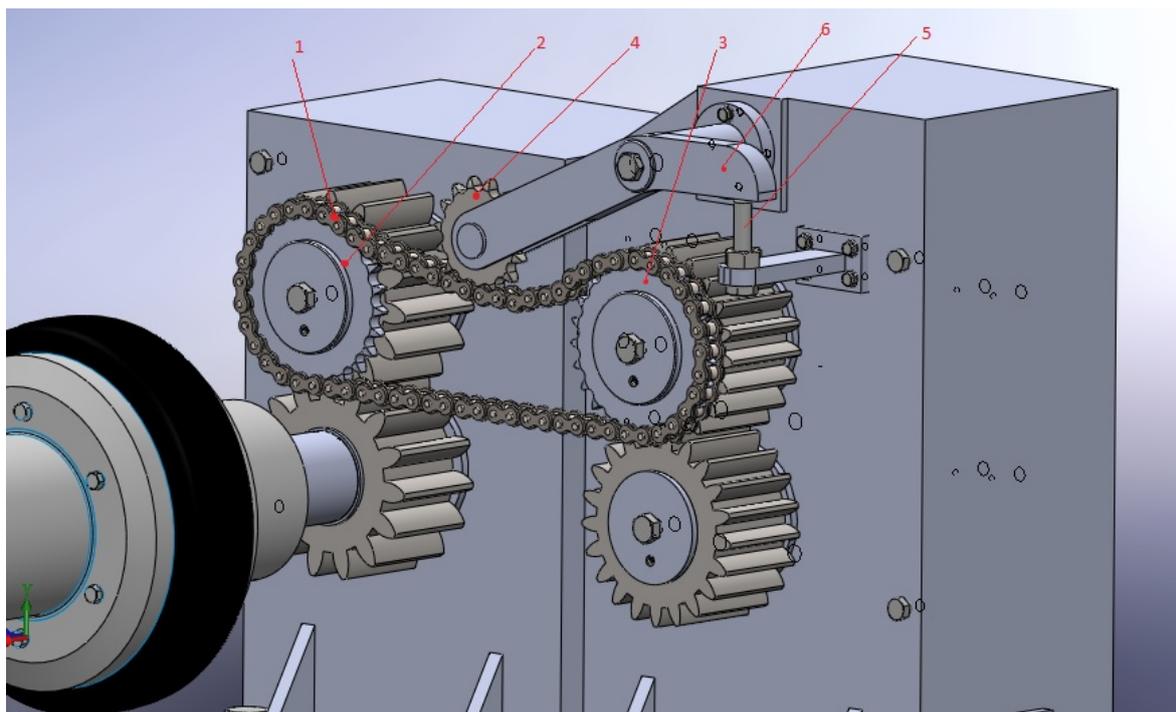


Рис. 5. Механизм передачи движения между двумя клетями вальцев

На рис. 4 показан общий вид ковочных вальцев. Ковочные вальцы состоят из двух клеток 1 и 2, объединенных общим приводом. Клеть 1 является подвижной, а клеть 2 - неподвижной, что позволяет регулировать расстояние между ними. Положение подвижной клетки регулируется винтовым механизмом. Клетки установлены на общей плите 3. В станинах каждой клетки размещены приводные валы, на концах которых закреплены рабочие валки 4 и 5.

Привод вальцев осуществляется от мотор-редуктора 6, выходной крутящий момент которого равен 6500 Нм. Этот момент передается через упругую торообразную муфту 7 на нижний приводной вал. Нижний и верхний приводные валы каждой клетки связаны между собой через зубчатую передачу

На рис. 5 представлен механизм передачи движения между двумя клетями вальцев.

С целью регулирования расстояния между клетями кинематическая связь между ними осуществляется цепной передачей 1. Длина цепи позволяет регулировать расстояние между звездочками 2, 3 путем изменения величины прогиба ведущей ветви. Для фиксации необходимого прогиба цепи предусмотрена промежуточная звездочка 4. Положение этой звездочки регулируется упором 5, воздействующим на плечо рычага 6.

На рис. 6 показано устройство передачи и кантования заготовок, установленное между двумя клетями. Это устройство состоит из кронштейна 1, на котором закреплен качающийся пневмоцилиндр 2, приводящий в движение кантователь 3 и неподвижные направляющие втулки 4.

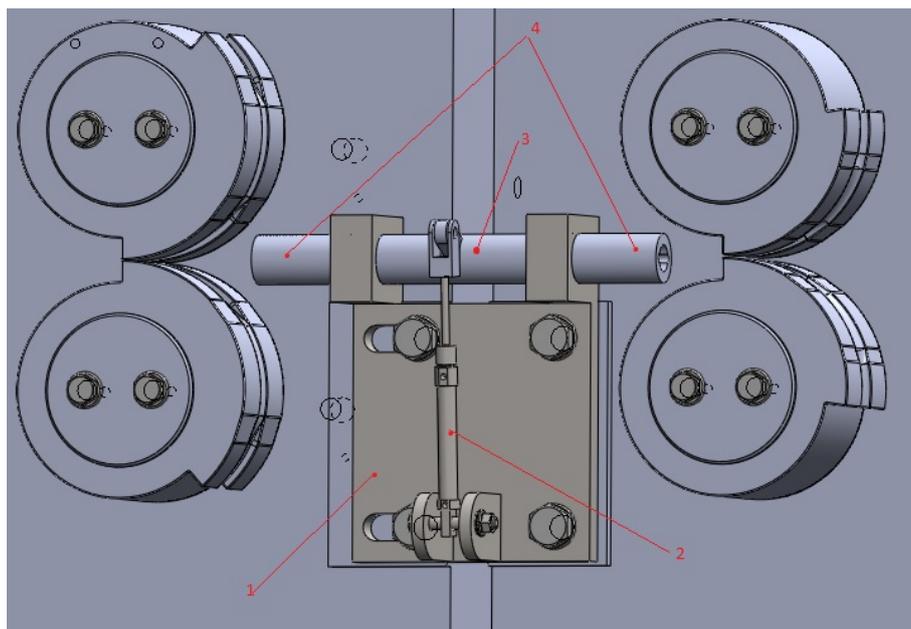


Рис. 6 Устройство передачи и кантования заготовок

На рис. 7 показан кантователь в разрезе.

В соответствии с полученными данными программного комплекса QForm определен внутренний профиль направляющих втулок и кантователя, соответствующий положению заготовки при выходе из первой клетки и на входе ее во вторую клетку.

При выходе из первой клетки заготовка попадает в неподвижную направляющую втулку 4 в положении, показанном в сечении В-В и далее в кантователь (см. сечение С-С). Пневмоцилиндр поворачивает кантователь на 90 градусов и заготовка занимает положение, показанное в сечении D-D, соответствующее профилю направляющей на входе во вторую клетку.

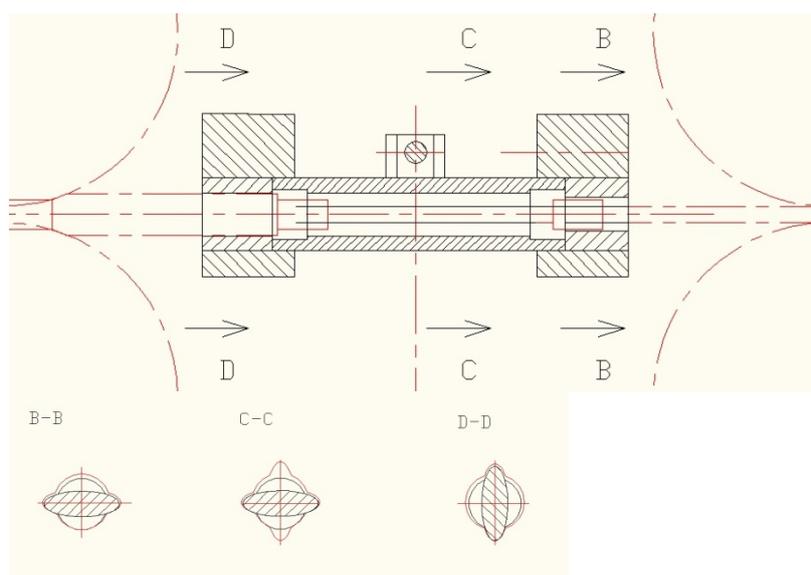


Рис. 7. Кантователь

В заключении следует отметить отличительные особенности разработанных ковочных вальцев, встраиваемых в автоматическую линию. Во-первых, это способ подачи заготовок, когда каждая предыдущая заготовка толкает последующую, во-вторых, регулировка расстояния между клетями и, в-третьих, кантовка заготовок на участке перехода от первой клетки ко второй.

Литература

1. В.К. Смирнов. Вальцовка заготовок под штамповку. - М.: Машиностроение, 1964. -120 с.
2. А.Н. Банкетов, Ю.А. Бочаров, Н.С. Добринский и др. Кузнечно-штамповочное оборудование: Учебник для машиностроительных вузов под ред. А.Н. Банкетова, Е.Н. Ланского. -2-е изд., перераб. и доп. -М.: Машиностроение, 1982.-576 с.
3. Дунаев П.Ф. Конструирование узлов и деталей машин: Учеб.пособие для студ. техн. спец. вузов / П.Ф. Дунаев, О.П. Леликов.-8-е изд., перераб. и доп. - М.: Издательский центр

УДК 621.961.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗКИ ТРУБ ПЛОСКИМ НОЖОМ

Елена Константиновна Дунда

*Магистрант 1 года обучения,
кафедра «Системы пластического деформирования»,
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»*

*Научный руководитель: Е.И. Лыжников,
кандидат технических наук, профессор кафедры «Системы пластического деформирования»,
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»*

Операции разделения труб на заготовки являются неотъемлемой частью металлообрабатывающего производства. На сегодняшний день существует множество способов резки труб, которые можно разделить на отходные и безотходные, каждый из которых характеризуется совокупностью технико-экономических показателей и имеет свою рациональную область применения.

Наиболее используемый способ резки труб - разрезка дисковым ножом. В патроне токарного станка зажимается труба, а диск закреплен в суппорте. При перемещении суппорта диск внедряется во вращающуюся трубу, пластически деформируя ее, что обеспечивает отделение заготовки. Недостатком такого способа является малая производительность и наличие на отрезанной заготовке и трубе зоны пластического наплыва металла, который необходимо удалять.

В мелкосерийном производстве для разделения труб на заготовки используют разрезку резцами на токарно-отрезных станках. Преимуществами способа является его универсальность и простота, недостатком - низкая производительность, малая стойкость резцов. В кузнечно-заготовительном производстве этот способ находит ограниченное применение.

Также существует способ резки труб сдвигом, обеспечивающий высокую производительность [1]. Труба устанавливается в штамп на оправку неподвижного ножа и затем перемещается до упора на оправку подвижного ножа. Подвижный нож

опускается и отрезает кольцевую заготовку. К недостаткам метода безотходной резки сдвигом следует отнести высокую точность базирования внутренних оправок для устранения возможного искривления отрезаемой заготовки.

Резка труб плоским ножом является перспективным направлением. Недостатком этого метода является момент начального внедрения ножа в трубу, что приводит к деформации отрезаемой заготовки. С целью устранения этого явления созданы штампы усложненной конструкции, обеспечивающие деформацию верхнего сечения трубы для увеличения вертикальной устойчивости при внедрении ножа [2]. Другим недостатком является отделение от трубы стружки–отхода, равного толщине ножа.

Деформацию профиля заготовки можно устранить применением вспомогательной операции, предшествующей резу трубы. Она заключается в том, что вспомогательный (надрезающий) нож прорезает в верхней части трубы паз шириной, равной толщине ножа [3]. При таком способе устраняется возможность деформации сечения трубы в начальный момент внедрения ножа. Перемещение ножа на всем сечении позволяет получить качественную заготовку.

Целью данной работы является проведение экспериментальных исследований и определение силовых параметров резки труб плоским ножом, изучение влияния конфигурации ножа на процесс отделения заготовки от трубы и стружки-отхода по ходу ножа.

Рассмотрим процесс надрезки трубы (рис. 1). Надрезающий нож имеет толщину 2 мм. Высота надрезаемого паза равна двум толщинам стенки трубы. Значение этого параметра выбрано из конструктивных соображений и удовлетворяет условию, при котором в начальный момент движения основного ножа не происходит смятия кольцевого профиля трубы.

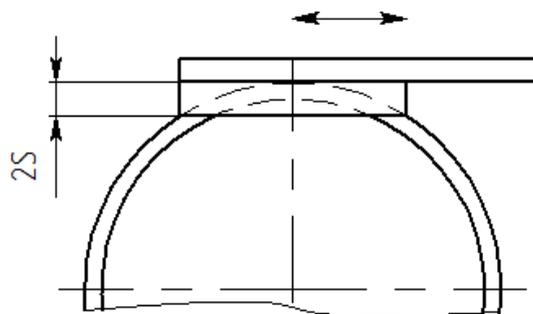


Рис. 1. Прорезка паза в верхней части трубы

Процесс прорезки паза надрезающим ножом аналогичен работе строгального резца [4]. Поэтому схема сил, действующих на надрезающий нож, будет подобна схеме сил, действующих на лезвие резца (рис. 2).

В точке М к передней поверхности лезвия резца приложены приведенная нормальная сила Q , перпендикулярная передней поверхности резца и определяющая сопротивление металла пластической деформации, и приведенная сила трения fQ , возникающая в связи с перемещением стружки по передней поверхности. В точке О к задней поверхности лезвия резца приложены приведенная сила R , перпендикулярная направлению главного движения резца со скоростью V , и приведенная сила трения fR , направленная против направления движения резца. Сила резания P приложена в точке М к передней поверхности, по направлению действия совпадает со скоростью резания V перемещения строгального резца.

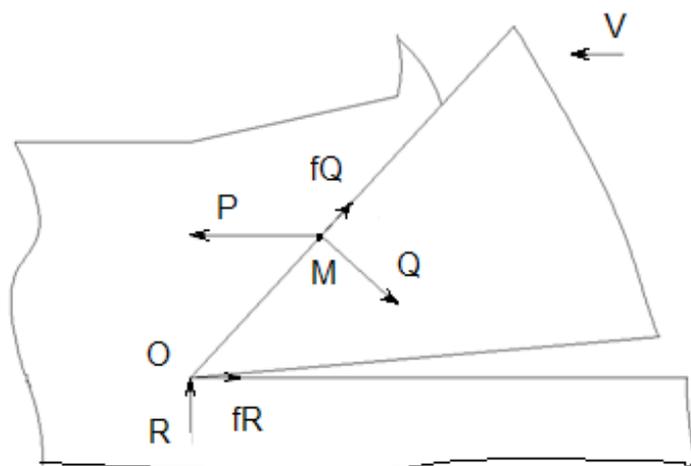


Рис. 2. Схема сил, действующих на лезвие строгального резца

Рассмотрим процесс резки трубы плоским ножом при условии предварительной прорезки паза в верхней части трубы (рис. 3).

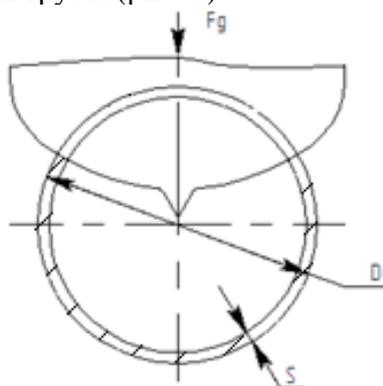


Рис. 3. Схема резки трубы плоским ножом

В эксперименте использовалась труба из алюминиевого сплава АК7 диаметром $D = 50$ мм, с толщиной стенки $S = 2$ мм. Для оценки силовых параметров резки выполнялась на разрывной машине с записью кривой усилия (рис. 4).

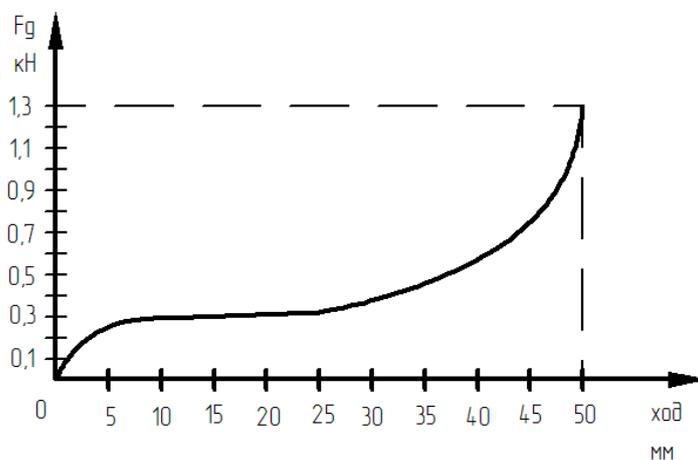


Рис. 4. График усилия резки трубы

Из графика видно, что на большей части перемещения ножа относительно трубной заготовки усилие практически постоянно, так как площади материала под режущей кромкой ножа приблизительно одинаковы. При правильном выборе профиля режущей кромки ножа это условие будет соблюдаться на всем ходе [5]. Увеличение усилия на конечном этапе объясняется тем, что при таком профиле ножа происходит отделение большого объема отхода.

Особенностью резки трубы плоским ножом также является перемещение отхода при ходе ножа. В верхней зоне трубы нож сдвигает отход-стружку внутрь трубы, образуя упрочненный завиток металла. Направление отделения отхода от заготовки зависит от направления нормальной составляющей силы резания N относительно касательной к средней линии кольца в поперечном сечении заготовки (рис. 5).

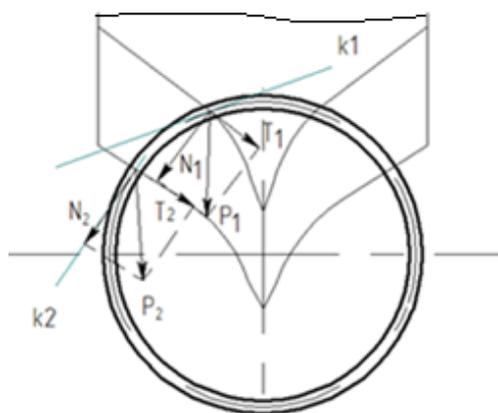


Рис. 5. Силы, действующие со стороны режущей кромки:
 P - сила резания, приложенная к одной кромке ножа;
 N - нормальная составляющая силы резания, направленная перпендикулярно к плоскости ножа;
 T - касательная составляющая силы резания;
 k - касательная к средней линии кольца в поперечном сечении заготовки

До определенного угла разрезки сила N направлена внутрь трубы относительно касательной. До этого момента стружка-отход отделяется внутрь трубы. После этого сила N начинает действовать в направлении от трубы и происходит образование наружного отхода. При этом до определенного хода ножа внутренний отход и вновь образовавшийся наружный по причине высокого удельного усилия перемещаются вниз как единый элемент (рис. 6, *а*). При положении ножа, близком к отрезке заготовки, внутренний отход отделяется от наружного (рис. 6, *б*). После отрезки заготовки наружный отход проваливается вниз, а внутренние завитки выпадают из трубы совместно с заготовкой после подачи трубы на шаг резки.



а



б

Рис. 6. Отделение отхода при резке трубы:
а - движение наружного и внутреннего отходов как единого элемента;
б - отделение отхода-стружки при положении ножа близком к отрезке

Угол разрезки, при котором начинается отделение отхода наружу, зависит от профиля ножа. В процессе эксперимента были рассмотрены три конфигурации ножа, представленные на рис. 7.

Выявлено, что наименьший угол разрезки соответствует профилю с прямым углом в вершине ножа.

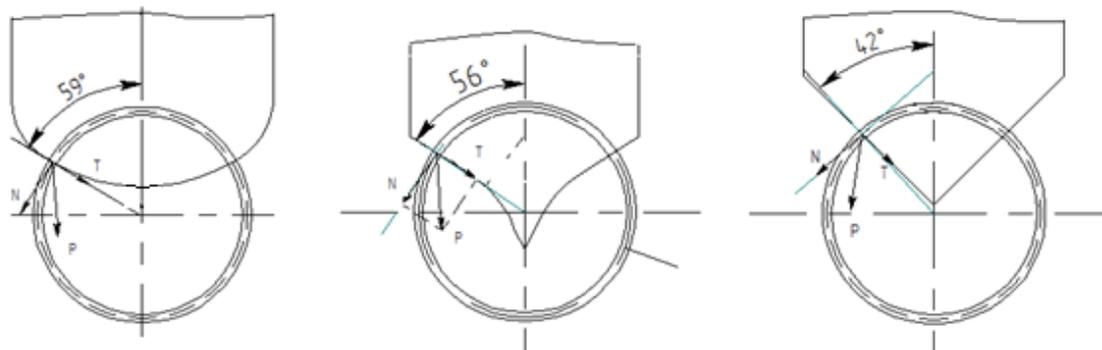


Рис. 7. Конфигурации ножей

В процессе эксперимента необходимо было выбрать оптимальный профиль ножа. Параметром выбора послужило условие минимальной величины хода ножа для отделения заготовки, что осуществимо при использовании ножа конфигурации 1.

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования по резке труб плоским ножом показали перспективность данного процесса, выявили последовательность образования стружки-отхода по ходу ножа, позволили определить оптимальный профиль ножа, оценить силовые параметры резки.

Литература

1. *Стеблюк В.И.* Методы усовершенствования способов резки труб на короткие заготовки // *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов.* - Краматорск: Донбасская государственная машиностроительная академия, 2009. №1. - С.287-290.
2. *Мещерин В.Т.* Листовая штамповка: Атлас схем. - М.: Машиностроение, 1975. - 227 с.
3. *Нефедов А.П.* Конструирование и изготовление штампов. - М.: Машиностроение, 1973. - 408 с.
4. *Грановский Г.И., Грановская В.Г.* Резание металлов: учебник для вузов. - М.: Высш. шк., 1976. - 304с.
5. *Ильин Л.Н., Семенов И.Е.* Технология листовой штамповки: учебник для вузов. - М.: Дрофа. 2009. - 475 с.

УДК 621.833.15

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕССОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Алексей Михайлович Дюжев

*Студент 3 курса,
кафедра «Технологии обработки металлов давлением»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: А.А. Головин,
доктор технических наук, профессор кафедры «Теория механизмов и машин»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Для зубчатых передач механических прессов характерными являются передаточные отношения выше 3. типовой расчет, предлагаемый в курсе «Детали машин» [2], ориентирован на передачи с меньшим передаточным отношением.

Проектный расчет зубчатой передачи проводится с целью определения геометрических размеров передачи, обеспечивающих ее работоспособность и надежность. В качестве исходных данных такого расчета выступают нагруженность передачи, требуемый ресурс, механические характеристики зубчатых колес и условия эксплуатации.

Нахождение геометрических размеров передачи (в частности, ее межосевого расстояния a_w) – итеративный процесс. Он заключается в определении предварительных размеров передачи с последующими проверочными расчетами по критериям работоспособности. В случае удовлетворительного результата предварительные размеры принимаются в качестве окончательных. В противном случае, они корректируются до тех пор, пока не станут удовлетворять всем критериям работоспособности. Способ получения предварительных значений геометрических размеров передачи жестко не регламентируется. Таким образом, предварительные размеры можно задавать произвольно, однако в этом случае возможно увеличение количества итераций.

Обычно предварительные размеры передачи находятся из основного условия прочности. Таким условием могут служить контактные или изгибные напряжения или величина диссипации энергии в процессе работы передачи. Для закрытых передач с хорошим отводом смазки основным условием является контактная прочность, дополнительным – изгибная прочность.

В качестве исходной принимается формула Герца для наибольших контактных напряжений при сжатии цилиндров вдоль образующих при коэффициенте Пуассона $\mu=0,3$:

$$\sigma_H = 0,418 \sqrt{\frac{EQ^n}{b} \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right)}$$

Расчеты параметров передачи, в частности, межосевого расстояния, проводятся по контактным напряжениям в полюсе зацепления и не учитывают распределение контактных напряжений по всей длине активного участка зацепления:

$$a_w = 450(u+1) \sqrt[3]{\frac{K_H T_1}{\psi_{ba} u [\sigma_H]^2}}$$

Этот расчет прост, но как будет показано далее, напряжения в полюсе зачастую не являются наибольшими.

При известном a_w находится диапазон ($m_{\min} \dots m_{\max}$) модулей, из которого принимается значение m , согласующееся со стандартным. По известным значениям a_w , m и коэффициентов смещения x_1 , x_2 (принимаются сходя из общих рекомендаций) находятся остальные предварительные значения геометрических параметров передачи, в том числе, числа зубьев z_1 и z_2 и диаметры $d_{1,2}$, $d_{b1,2}$, $d_{a1,2}$.

Далее проводится проверка зубьев колес по контактным напряжениям и напряжениям изгиба:

$$\sigma_H = \frac{Z_\sigma}{a_w} \sqrt{\frac{K_H T_1 (u+1)^3}{b_2 u}} \leq [\sigma_H],$$

$$\sigma_{F1} = \frac{\sigma_{f2} Y_{FS1}}{Y_{FS2}} \leq [\sigma_{F1}],$$

$$\sigma_{F2} = \frac{K_F F_t}{b_2 m} Y_{FS2} Y_\varepsilon \leq [\sigma_{F2}],$$

где Y_{FS} – коэффициент, учитывающий форму зуба и концентрацию напряжений, Y_ε – коэффициент, учитывающий перекрытие зубьев. Следует отметить, что воспринимаемое смещение um и генерирующие его смещения колес $x_1 m$ и $x_2 m$ в расчете назначаются или в соответствии с ГОСТом на зубчатые передачи, к которым не предъявляются особые требования, либо каким-либо иным способом [3].

Цилиндрическое эвольвентное зацепление геометрически можно представить в виде «скелета» - комплекса точек $O_1 - N_1 - N_2 - O_2$ на плоскости. При этом соблюдаются зависимости:

$$O_1 N_1 = r_{b1},$$

$$O_2 N_2 = r_{b2},$$

$$O_1 O_2 = a_w,$$

$$\angle N_1 O_1 O_2 = \angle N_2 O_2 O_1 = \alpha_w.$$

На линии $N_1 - N_2$ точками B_1, B_1^*, B_2^*, B_2 изображается линия активного зацепления. Справедливы соотношения:

$$O_1 B_2 = r_{a1},$$

$$O_2 B_1 = r_{a2},$$

$$B_1 B_2^* = B_2 B_1^* = p_b = p \cos \alpha.$$

Также на линии $N_1 - N_2$ отмечается полюс P : пересечение $N_1 - N_2$ и $O_1 - O_2$.

Ограничения при создании передачи являются $z_{\min}, x_{\min}, S_{a \min} \rightarrow x_{\max}, \varepsilon_{a \min}$.



Рис. 1. Общая схема традиционного проектного расчета

Для определения КПД зацепления необходимо найти значения полезной мощности и мощности потерь на трение в зацеплении:

$$\eta = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{затр}}} = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{пол}} + P_{\text{тр}}} = \frac{1}{1 + f \cdot \frac{\int_{B_1}^{B_2} \frac{Q^n}{Q_{\text{нб}}^n} \frac{V_{\text{ск}}}{V^n} ds}{\int_{B_1}^{B_2} \frac{Q^n}{Q_{\text{нб}}^n} ds}}$$

Критериями, определяющими свойства эвольвентного зацепления можно принять следующие безразмерные параметры [1]:

- аналог контактного напряжения (геометрическая составляющая формулы Герца)

$$\sigma = \sigma_Q \sigma_\rho, \text{ где } \sigma_Q = \sqrt{\frac{Q^n}{Q_{\text{нб}}^n}}; \sigma_\rho = \sqrt{\frac{1}{\rho_1/r_{b1}} + \frac{1}{\rho_2/r_{b1}}}$$

- аналог диссипации мощности в зацеплении $f \sigma \frac{v_{\text{ск}}}{v^\tau}$.

Для закрытой эвольвентной зубчатой передачи характерным является хороший отвод смазки и, соответственно, основным условием является контактная прочность, дополнительным – изгибная прочность, а безразмерным критерием – аналог контактного напряжения.

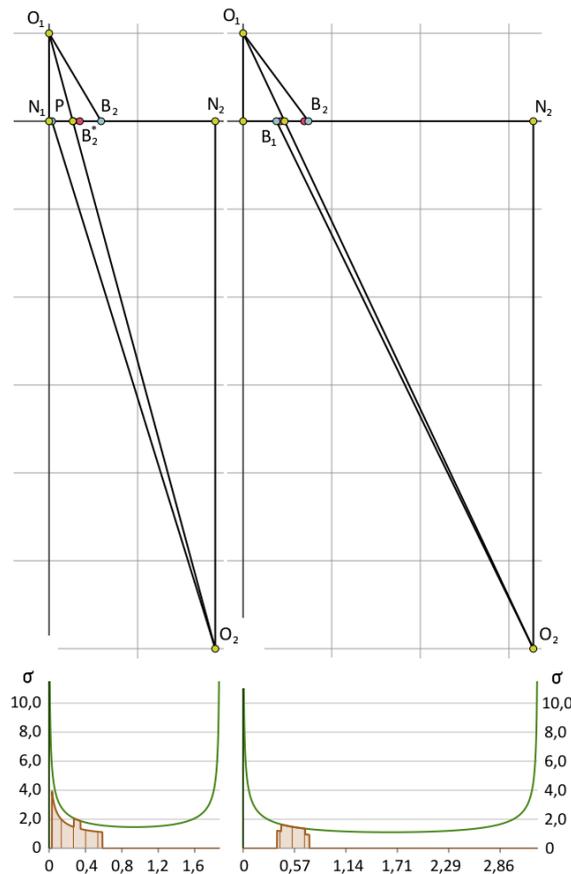
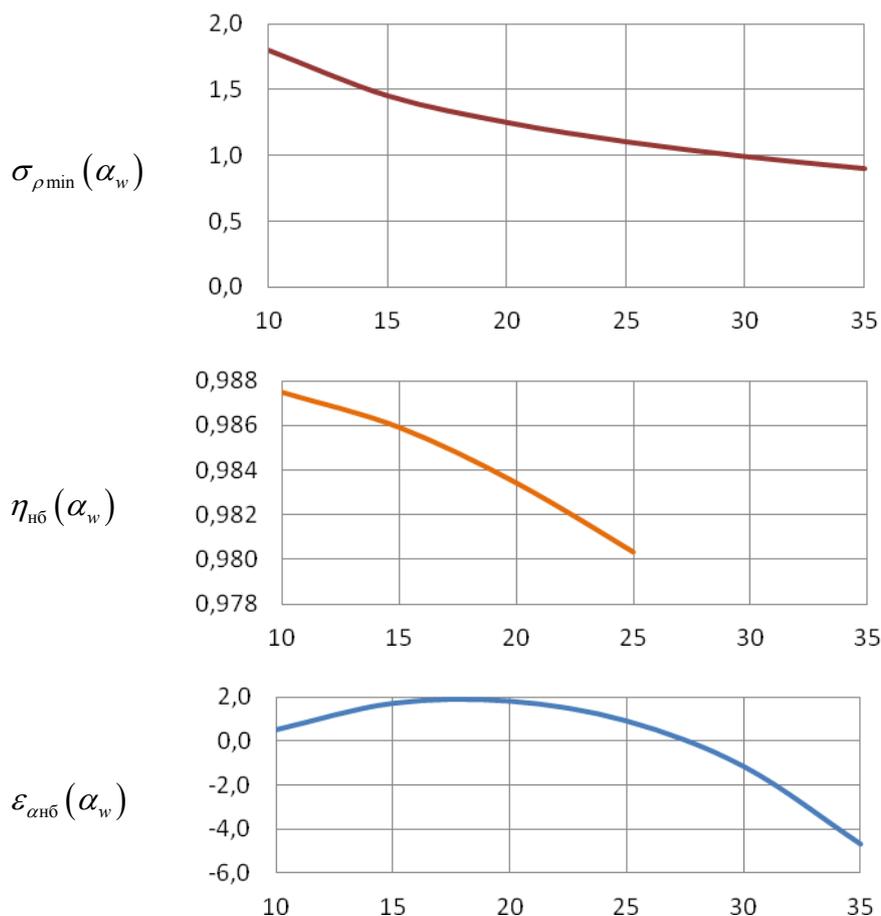


Рис. 2. Распределение σ в зависимости от a_w

На рис. 2 представлены примеры распределения σ для двух значений угла зацепления. Очевидно, что для заданного передаточного отношения распределение контактных напряжений на активном участке линии зацепления меняется с изменением угла зацепления α_w , причем с увеличением угла уменьшается минимальное значение аналога контактных напряжений $\sigma_{\rho\min}$, а, следовательно, и возможные контактные напряжения в зацеплении.

Однако с увеличением значения α_w уменьшаются значения верхней границы КПД η и наибольшего коэффициента перекрытия $\varepsilon_{\alpha\text{нб}}$. При фиксированном угле зацепления их значения зависят от соотношения коэффициентов смещения x_1 и x_2 , определяющих положение линии активного зацепления.

Таким образом, подбор выгодного распределения σ вдоль линии зацепления неоднозначен. С одной стороны, увеличивая угол α_w , мы получаем меньшие значения аналога контактных напряжений, а с ним и уменьшенные размеры передачи, с другой же, уменьшаются значения коэффициента перекрытия ε_α и КПД η . возможным выходом из этой ситуации являются построение графиков $\sigma_{\rho\min}(\alpha_w)$, $\varepsilon_\alpha(\alpha_w)$, $\eta(\alpha_w)$ и выбор на их основе угла α_w , при котором параметры передачи наиболее выгодны.



Введем безразмерные аналоги σ_Q и σ_ρ , нормированные по $\frac{1}{Q_{нб}^n}$ и $\frac{1}{r_{b1}}$ соответственно:

$$\sigma_Q = \sqrt{\frac{Q^n}{Q_{нб}^n}}; \sigma_\rho = \sqrt{\frac{1}{\rho_1/r_{b1}} + \frac{1}{\rho_2/r_{b1}}}$$

Их произведение $\sigma = \sigma_Q \sigma_\rho$ является также безразмерным и характеризует относительную величину контактных напряжений, распределенных по линии зацепления. С его помощью при выборе выгодных коэффициентов смещения легко обособиться от конкретных размеров передачи, ограничиваясь лишь передаточным отношением u и величиной угла зацепления α_w .

Ширина зубчатого венца b связана через коэффициент ψ_{ba} с межосевым расстоянием a_w , которое может быть выражено через передаточное отношение:

$$\begin{cases} b = \psi_{ba} a_w, \\ a_w = \frac{r_{b1}(u+1)}{\cos \cos \alpha_w}; \end{cases} \Rightarrow b = \frac{\psi_{ba} r_{b1} (u+1)}{\cos \alpha_w}$$

Наибольшее значение силы $Q_{нб}^n$ может быть выражено через момент на шестерне:

$$Q_{нб}^n = \frac{T_1}{r_{b1}}$$

Подставляя эти выражения в формулу Герца, получаем:

$$\sigma_H = 13,22 \sqrt{\frac{ET_1 \cos \alpha_w}{\psi_{ba} r_{b1}^3 (u+1)}} \sigma_Q \sigma_\rho,$$

откуда:

$$\begin{aligned} r_{b1} &\geq 5,59 \sqrt[3]{\frac{ET_1}{\psi_{ba} (u+1)} \frac{\sigma_{нб}^2 \cos \alpha_w}{[\sigma_H]^2}}, \\ a_w &= \frac{r_{b1} (u+1)}{\cos \cos \alpha_w} \Rightarrow \\ \Rightarrow a_w &\geq 5,59 \sqrt[3]{\frac{ET_1 (u+1)^2}{\psi_{ba} [\sigma_H]^2 \cos^2 \cos^2 \alpha_w} \frac{\sigma_{нб}^2}{\cos^2 \cos^2 \alpha_w}}, \\ r_{b1} &= \frac{mz_1}{2} \cos \cos \alpha \Rightarrow m = \frac{2r_{b1}}{z_1 \cos \cos \alpha}. \end{aligned}$$

Полученные формулы определяют методику проектного расчета передачи, представленную на рис. 3.

Ее появление привело к написанию автономного приложения GearGen[©], предполагающего интерактивный подбор выгодного распределения σ вдоль линии зацепления нативным перемещением линии активного зацепления.

Проектирование передачи всегда ограничивается условиями подрезания ($x_{1,2} \geq x_{1,2min}$), заострения ($S_{a1,2} \geq S_{a1,2min}$), минимального числа зубьев ($z_{1,2} \geq z_{min}$) и коэффициента перекрытия ($\varepsilon_\alpha \in [1,05; 2)$).



Рис. 3. Предлагаемая методика проектного расчета

При работе приложения эти ограничения обрабатываются в режиме реального времени, позволяя оценивать реальность создаваемой передачи. Это достигается двумя способами. В первом случае, для передачи с выбранными размерами проверяются параметры $x_{1,2}$, $z_{1,2}$, $S_{a1,2}$, ε_α . Возникающие ошибки отображаются на экране в виде текстовых подсказок. Во втором случае, используется графическое представление допустимых значений радиусов $r_{a1,2}$: их ОДЗ подсвечиваются на «скелете», что упрощает варьирование самих радиусов.

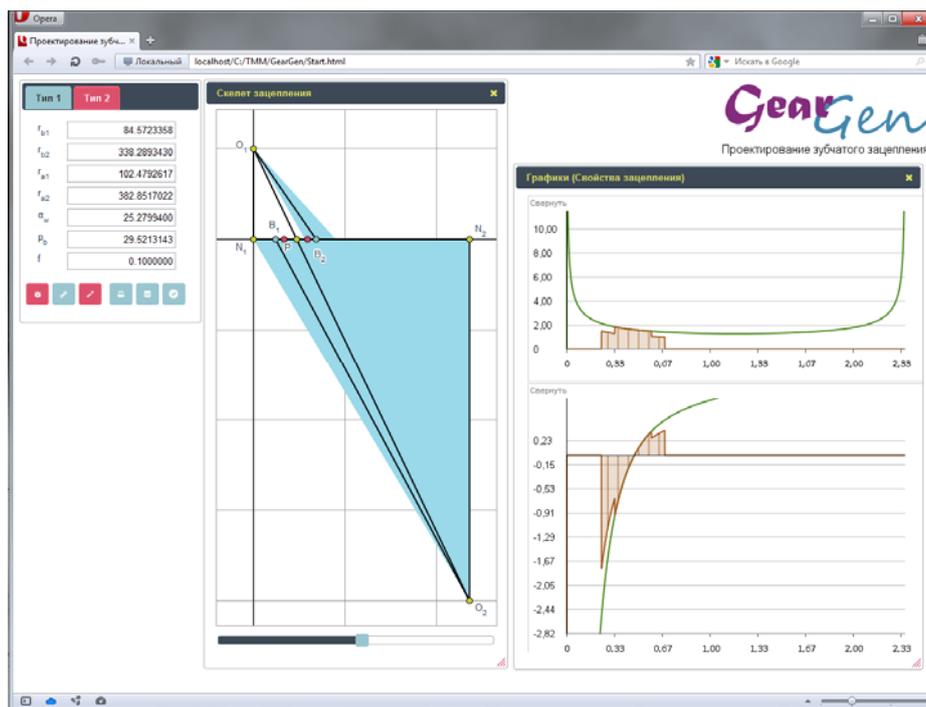


Рис. 4. Интерфейс программы GearGen

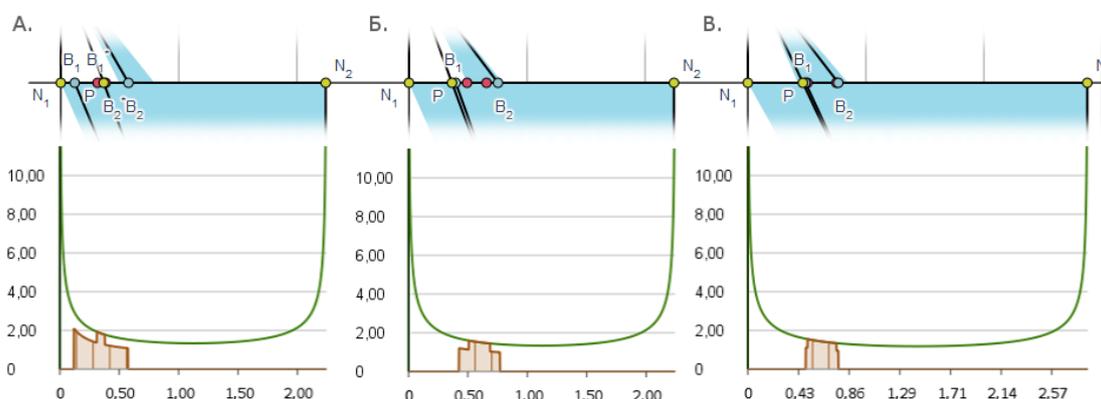


Рис. 5. Варьирование положения линии активного зацепления

В среде GearGen[©] заложены численный и графический методы работы с проектируемым зацеплением.

Графический интерфейс приложения дает возможность визуально изменять параметры передачи. Эта работа заключается в Drag&Drop-перемещении точек B_1 , B_2 и N_2 , определяющих положение линии активного зацепления $B_1 B_2$ и ширину линии зацепления $N_1 N_2$. При перемещении точки N_2 в пределах $15...35^\circ$ изменяется угол a_w , что влечет за собой изменение общего коэффициента смещения x_Σ и пересчет вида

$$x_2 = x_\Sigma - x_1 \rightarrow r_{a2}.$$

Перемещение точек B_1 и B_2 взаимно. Оно влияет на изменение радиусов r_{a1} и r_{a2} , зависящих от коэффициентов смещения x_1 и x_2 соответственно, связанных общим коэффициентом смещения x_Σ , который, в свою очередь, однозначно определяется углом зацепления a_w .

Табл. 1. Числовые результаты варьирования

a_w	20°	20°	25°
x_1/x_2	0/0	1,234/-1,234	1,547/1,517
$\sigma_{\rho\min}$	1,335	1,335	1,179
$\sigma_{нб}$	2,110	1,595	1,550
η	0,988	0,973	0,981
ε_α	1,738	1,317	1,063
a_w	179,1 мм	148,7 мм	149,4 мм

Для выбранного «скелета» в одних осях отображаются эпюры распределений σ_p и σ , зависящие исключительно от геометрических соотношений в «скелете». Изменения в последнем, вносимые любым способом, непосредственно влияют на содержимое эпюр. Обработка ограничений, описанная ранее, позволяет непосредственно оценить возможности по смещению линии активного зацепления с целью уменьшения (также оцениваемого визуально) аналога контактных напряжений.

На рис. 5 представлен пример варьирования параметров зацепления при фиксированном передаточном отношении $u = 5,167$. Соответствующие каждому из положений параметры приведены в таблице ниже. Минимальное межосевое расстояние a_w найдено для каждого случая по формуле из 3.1 при: $T_1 = 97,5H \cdot м$; $\psi_{ba} = 0,313$; $[\sigma_H] = 617,3 МПа$; $E = 2,1 \cdot 10^5 МПа$.

Вариант А представляет собой пример результата типичного расчета «деталей машин». Как мы видим, задание нулевых коэффициентов смещения дало большие значения коэффициента перекрытия и верхней границы КПД, однако вместе с тем напряжения в зацеплении достаточно велики (наибольшие значения в точках B_1 и B_1^*). При том же значении угла зацепления a_w при линии зацепления, максимально смещенной к центру линии N_1N_2 , что ограничивается $x_{1\max}$ из условия заострения, получаем вариант Б. Аналог контактных напряжений в этом случае уменьшен почти на 25%, что дает возможность при тех же допустимых напряжениях $[\sigma_H]$ получить передачу с a_w меньшим на 24 мм, что, несомненно, является выгодным. Коэффициент перекрытия в передаче меньше, верхняя граница КПД тоже несколько уменьшена, однако уменьшены и размеры передачи.

Случай В отличается увеличенным значением угла a_w . Как указывалось ранее, значения аналога контактных напряжений в этом случае должны уменьшаться. Однако конечное значение размера a_w зависит не только от $\sigma_{нб}$, но также и от величины угла a_w . Этим объясняется то, что при , уменьшенном еще на 0,045 по сравнению с вариантом Б, межосевое расстояние a_w увеличилось.

Традиционная методика проектного расчета сравнительно проста. Действительно, задаваясь контактными напряжениями в полюсе зацепления и определенными коэффициентами смещения можно легко перейти к размерам передачи. Однако, как показано на рис. 5, вар. А, аналог контактных напряжений в этом случае

принимает достаточно большие значения. Предлагаемый же метод дает возможность работать с зацеплением непосредственно, визуально уменьшая аналог контактных напряжений, что дает возможность получить меньшие размеры зацепления.

Кроме того, итеративным традиционно является процесс подбора размеров, что при проведении расчета «вручную» может сказаться на скорости его проведения. Предлагаемая методика подразумевает визуальные итерации на стадии подбора расположения линии зацепления, что дает возможность провести вычисления размеров только единожды.

Выводы

1. Предложена методика, отличающаяся от традиционной своей интерактивной визуальной составляющей, которая значительно упрощает понимание самого процесса расчета.

2. На примере было показано значительное уменьшение размеров передачи по сравнению с традиционной методикой при том же значении допускаемых напряжений $[\sigma_H]$.

Литература

1. *А.А. Головин, ред.* Высшая пара: геометрические аналоги износа. Москва, 2008.

2. *Д.Н. Решетов.* Детали машин: учебник для студентов машиностроительных механических специальностей вузов. 4-е, перераб. 1989.

3. *Т. Болотовская, И. Болотовский, Г. Бочаров и др.* Справочник по геометрическому расчету эвольвентных зубчатых и червячных передач. Машгиз, 1962

ГОРЯЧЕЕ ОБЪЕМНОЕ ДВУХСТОРОННЕЕ ВЫДАВЛИВАНИЕ ПОКОВКИ ТИПА КРЕСТОВИНА

Анатолий Юрьевич Зимин

Студент 5 курса,

кафедра «Технологии обработки давлением»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: В.А. Кривошеин,

кандидат технических наук, ассистент кафедры «Технологии обработки давлением»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Введение

Назначение крестовин карданного вала. Крестовина предназначена для обеспечения передачи крутящего момента. При передаче крутящего момента от коробки передач или раздаточной коробки к редукторам ведущих колес автомобилей необходимо обеспечить возможность взаимного перемещения узлов с учетом колебаний силового агрегата и перемещения редукторов при движении автомобиля. Для этой цели чаще всего используют карданные шарниры, простые по конструкции, надежные и долговечные (рис. 1).



Рис.1. Крестовин карданного вала

Было проведено исследование штамповки детали с помощью молота, одностороннего и двустороннего выдавливания. При штамповке на молоте необходимо предварительное осаживание заготовки, затем формоизменение с последующей обрезкой облоя (КИМ 0,5...0,6). Используя метод одностороннего выдавливания, отмечается значительная неравномерность в формировании отростков. Использование схемы двухстороннего выдавливания позволяет получить деталь с требуемыми физическими характеристиками, более высоким КИМ (0,9...0,95), значительно снизить количество механической обработки.

Основная часть

Задача исследования. Проведение моделирования на программном комплексе QForm с использованием моделей заготовок и инструмента созданных в Autodesk Inventor. Для всех вариантов моделирования температура нагрева заготовок 1200 С. Смазочное вещество gw-st-h - графитовая смазка, основанная на воде. Время охлаждения при облойной штамповке 3 сек, при выдавливании – 2. Охлаждение на воздухе. Температура инструмента 250 С.

Облойная штамповка

Штамповка на молоте. Операция проводится в 2 этапа. Первый этап – осадка цилиндрической заготовки до высоты 30 мм. Полученную поковку перемещают штамп для окончательной штамповки. Достаточно одного удара – объем невелик. Получаем поковку со значительным облоем.

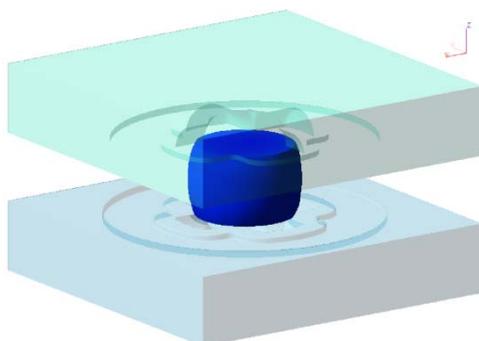


Рис. 2. Модели штампов и заготовки

Объем вследствие этого больше на 23% по сравнению с выдавливанием. Аналитические расчеты показывают необходимость применения молота с номинальной МПЧ 2 т. (МПЧ – масса падающих частей молота).

Объем заготовки с учетом угара $V = 49000 \text{ мм}^3$

Размеры заготовки: диаметр цилиндрической заготовки $D = 35 \text{ мм}$, высота $H = 51 \text{ мм}$

Ниже приведены модели штампов и заготовки (рис. 2).
Результаты моделирования представлены в табл. 1

Одностороннее выдавливание

Модель крестовины представлена на рис. 3.

Метод радиального выдавливания – используются закрытые штампы с разъемной матрицей. Как правило, они имеют довольно сложную конструкцию с упругими элементами.

Табл. 1. Результаты моделирования

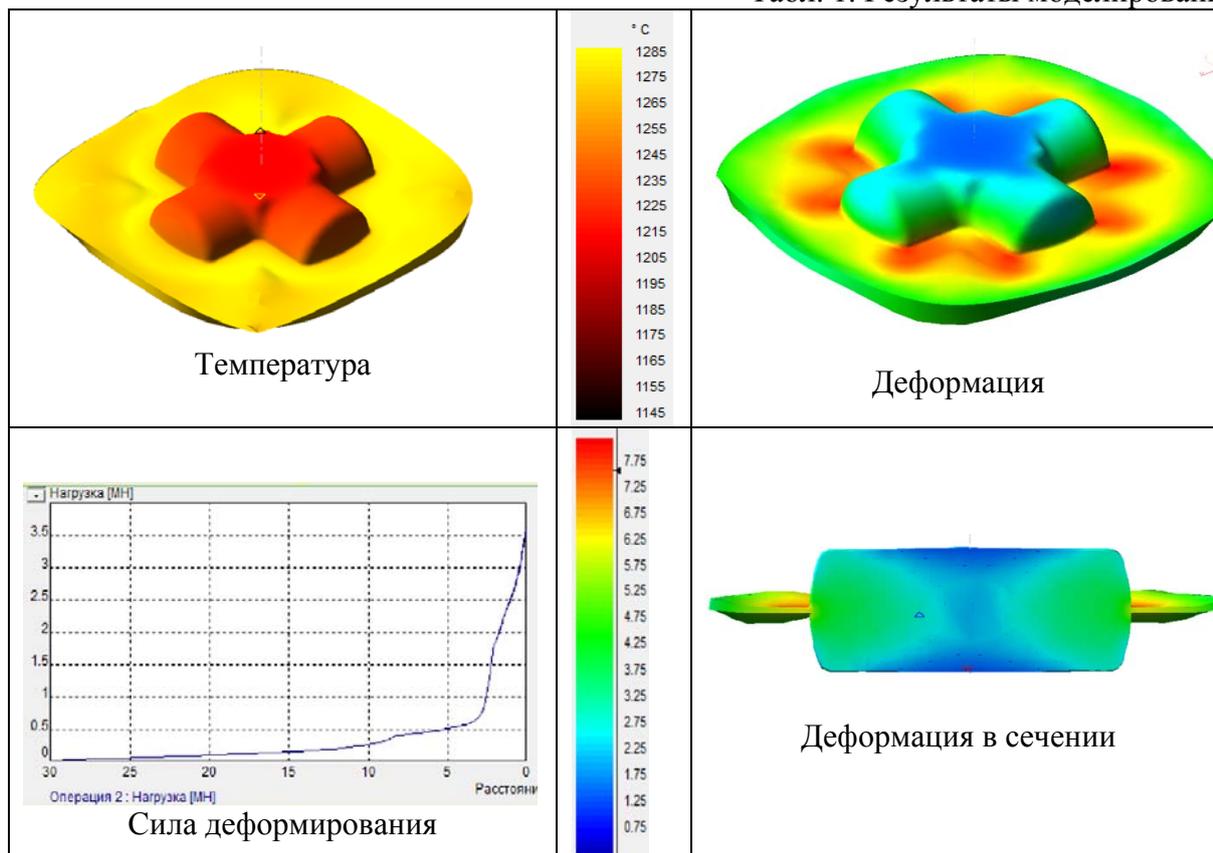


Рис. 3. Модель крестовины

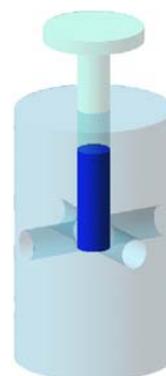


Рис. 4. Модель инструмента и заготовка

Форма крестовины в данном исследовании предусматривает выдавливание в один переход без предварительной осадки. Особенности данной схемы деформирования: течение металла происходит из верхнего канала матрицы вниз и происходит распределение металла по отрогкам штампа крестовины.

Аналитический расчет усилия деформирования показывает величину 13 МН. Выбираем пресс КГШП в 16 МН. показана на рис. 4.

Результаты моделирования представлены в табл. 2.

Из таблицы видно неравномерное заполнение крестовины в верхней части её отростков. Ввиду этого принято решение провести исследование штамповки крестовины двухсторонним выдавливанием.

Двухстороннее выдавливание

Новый процесс включает четыре операции:

1. Рубка прутков из стали 45 на заготовки длиной 98 мм
2. Нагрев в индукционном нагревателе до ковочной температуры 1200 °С
3. Двухстороннее выдавливание на КГШП

На первом этапе производится резка калиброванного прутка обрезным штампом на заготовки. Соотношение высоты заготовки к диаметру составляет 4, 5.

Результаты моделирования представлены в табл. 3.

В результате моделирования были получены следующие данные:

Несмотря на сходные картины расположения деформаций в толще заготовки, величины деформации при двухстороннем выдавливании несколько меньше и имеют более концентрированное расположение. Расположение волокон металла имеет направленный вдоль поверхности заготовки плавный характер, что благоприятно сказывается на механических характеристиках.

Моделирование «на молоте» показало увеличение абсолютной величины деформации в периферийных частях заготовки, что вместе с необходимостью удаления облоя приводит к увеличенной вероятности образования трещин и дополнительной механической обработке соответственно.

Табл. 2. Результаты моделирования

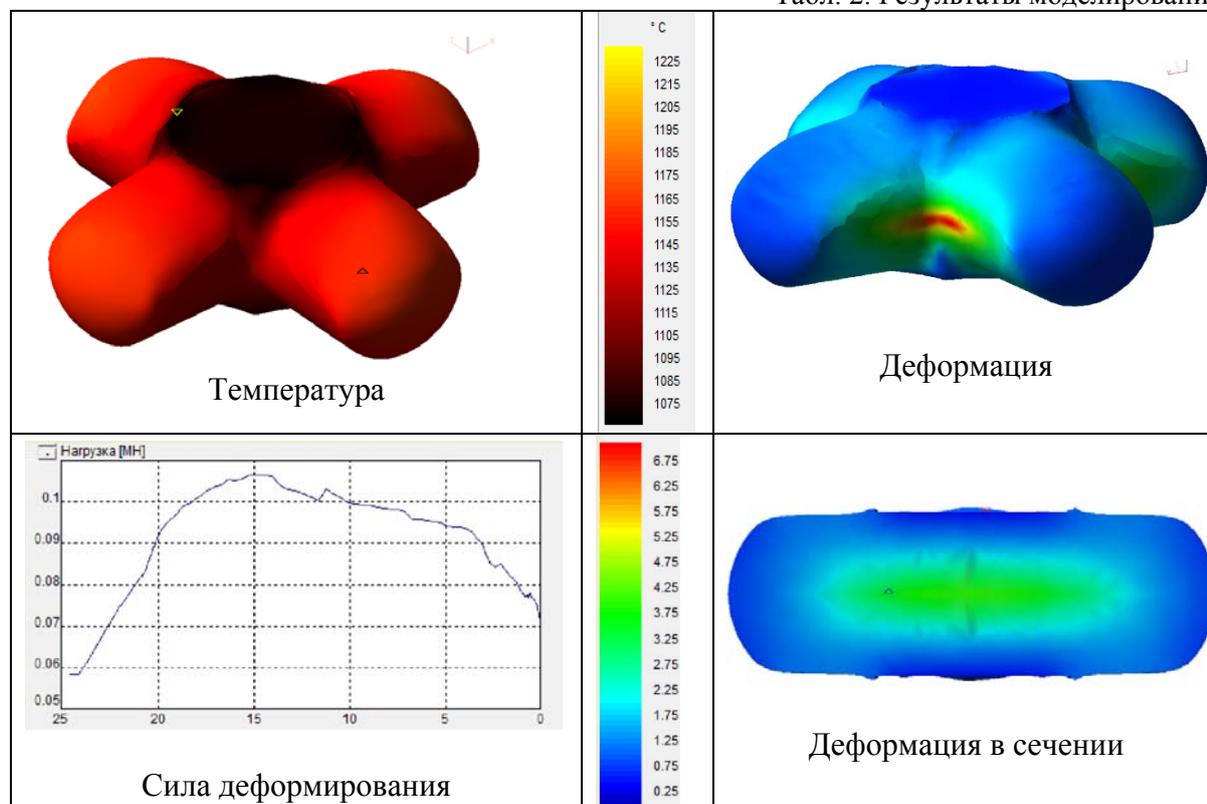
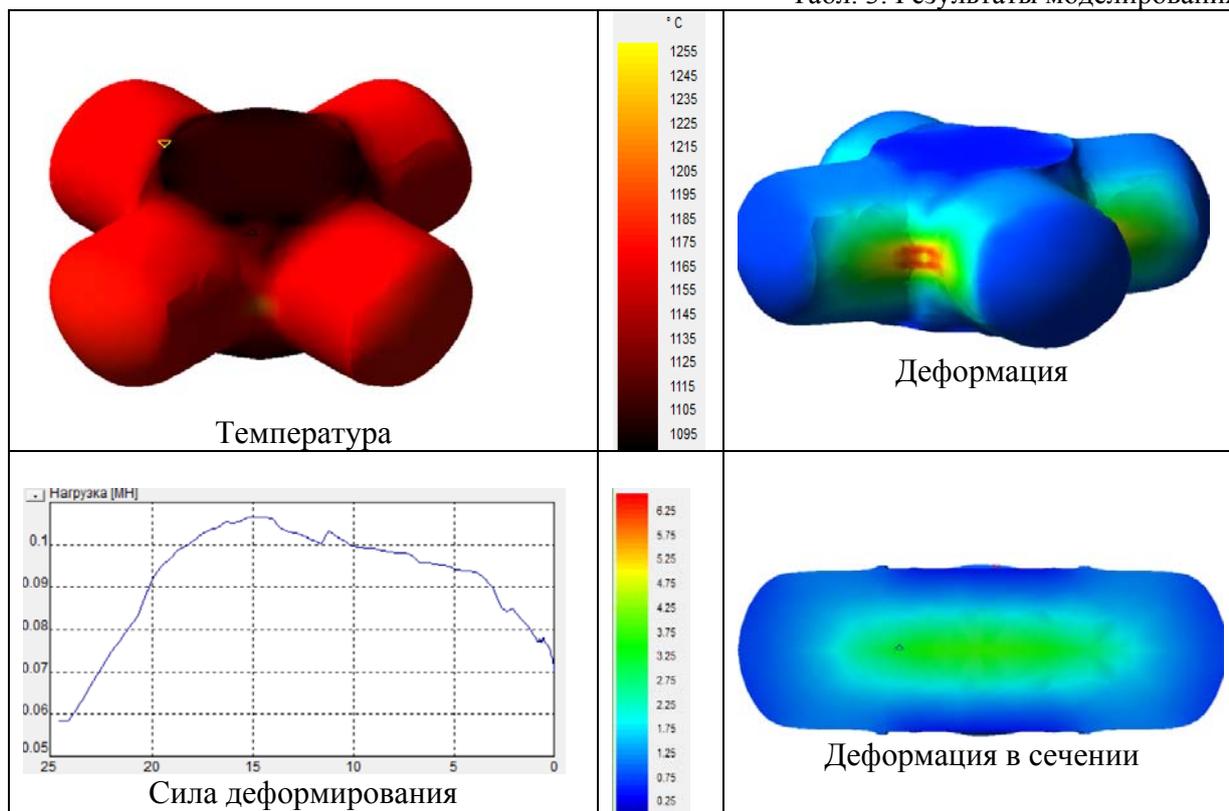


Табл. 3. Результаты моделирования



Штамп для выдавливания представлен на рис. 8.

Штамп состоит из комплекта четырех пружин, расположенных симметрично сверху и снизу, необходимых для обеспечения неразъемности матрицы во время деформирования.

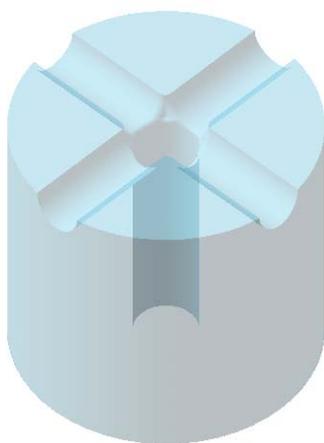


Рис. 5. Ручей штампа

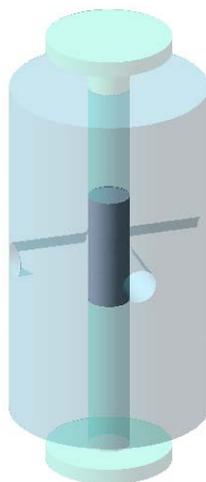


Рис. 6. Инструмент и заготовка в сборе

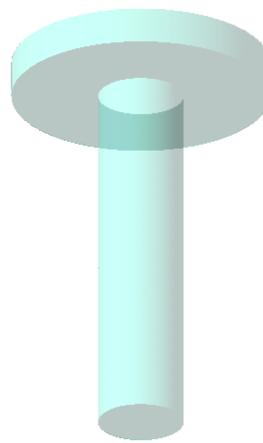


Рис. 7. Пуансон для окончательной операции

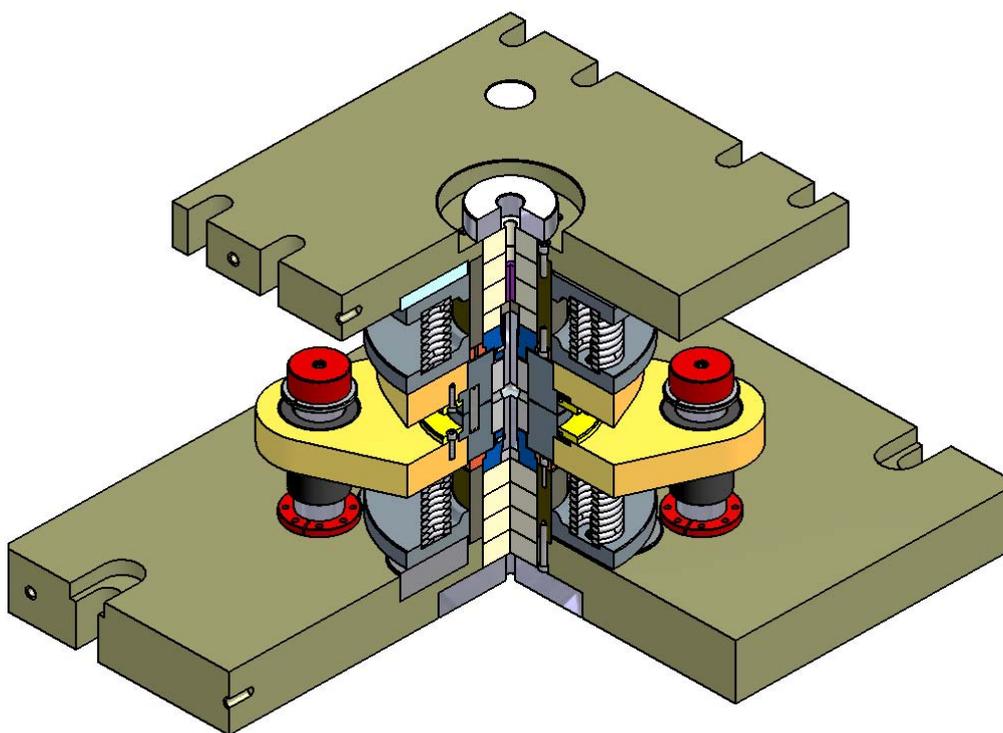


Рис. 8. Конструкция штампа для выдавливания

Табл. 4. Сравнительная таблица методов изготовления

	Штамповка на молоте	Одностороннее выдавливание	Двухстороннее выдавливание
КИМ	Низкий (50...60%)	Средний (80%)	очень высокий (90%...95%)
Производительность при штамповке	средняя	высокая	высокая
Производительность при механообработке	очень низкая	высокая	высокая
Наличие фрезерных операций	да	да	да
Общая производительность	низкая	средняя	средняя
Механические характеристики	средние	высокие	высокие
Технологичность	низкая	средняя	средняя
Стойкость штампового инструмента	средняя	средняя	средняя

Выводы

1. Предлагаемая технология изготовления детали “крестовина” двухсторонним выдавливанием является наиболее рациональной ввиду хороших физических характеристик, получаемых данным методом.

2. Сложность конструкции штампа обоснована особенностью схемы деформирования и оправдывается его эффективностью при штамповке. Сконструированная конструкция штампа может быть использована на универсальном оборудовании.

3. Моделирование в QForm позволило определить целесообразность изготовления крестовины без проведения эксперимента.

Литература

1. Ковка и штамповка. Справочник в 4 т., Т2. Горячая штамповка. /Под ред. Е. И. Семенова. Машиностроение 1986г.

2. Ковка и штамповка. Справочник в 4 т., Т1. Материалы и нагрев. /Под ред. Е. И. Семенова. Машиностроение 1985г.

3. Зиновьев И. С., Кондратенко В. Г., Чередниченко А. В. М/у к домашнему заданию по «Технологии ГОШ», 2000г.

УДК 621.73.08

СТРАТЕГИИ И ЦЕЛИ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ШТАМПОВКИ МЕТАЛЛА В ТВЁРДОЖИДКОМ СОСТОЯНИИ

Иван Михайлович Койдан

Аспирант 3 года,

кафедра «Технологии обработки давлением»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Ю.А. Бочаров,

доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии обработки металлов давлением»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Применение адаптивных систем числового программного управления штамповочным комплексом позволяет производить оперативную регулировку основных параметров технологического процесса с целью получения высококачественных поковок, снижения количества брака, повышения надёжности работы штамповочного комплекса. Такие возможности системы управления особенно актуальны при изготовлении деталей методами твёрдожидкого деформирования (тиксостамповки).

Процессы тиксостамповки позволяют получать высококачественные детали сложной геометрии за один штамповочный переход с незначительными, в сравнении с традиционной штамповкой, энергетическими затратами. Тиксотехнологии обладают рядом преимуществ, реализация которых может быть достигнута за счёт эффективности и надёжности работы системы адаптивного управления. Эффективность

и надёжность работы системы управления в первую очередь основывается на правильном выборе стратегии и цели управления.

Стратегия и цель управления определяется технологией (геометрия поковки, материал заготовки, конструкция штампа, требование к соотношению твёрдой/жидкой фазы в нагретой заготовке и др.) и техническими возможностями применяемого оборудования.

Целью системы адаптивного управления является получение высоких геометрических (точность геометрии, качество поверхности) и качественных (сохранение глобулярной структуры, твёрдость, отсутствие пористости, усадочных раковин и других различных дефектов) характеристик поковки. Однако для этого необходимо иметь полное представление о технологических параметрах процесса и верно определить стратегию управления для того или иного процесса штамповки. В табл. 1. приведены основные технологические параметры тиксоштамповки и результаты, вызванные отклонением заданных величин от нормы.

Данных из табл. 1 дают основания для определения следующих стратегий управления:

- управление заготовкой (температура нагрева заготовки, гомогенизация свойств нагретой заготовки по сечению);
- управление оборудованием (скорость деформирования);
- управление штамповым инструментом (температура нагрева штампового инструмента);

Табл. 1. Технологические параметры тиксоштамповки и результаты отклонения их от нормы

Технологические параметры штамповки	Отклонение от нормы	Результат отклонения от нормы
Температура штампового инструмента	в большую сторону	изменение свойств смазывающего вещества
	в меньшую сторону	незаполнение полости штампа;
Температура заготовки	в большую сторону	затруднения при установке заготовки в штамп; повышенная тепловая нагрузка на штамповый инструмент; увеличение времени выдержки под давлением;
	в меньшую сторону	незаполнение полости штампа; повышенная силовая нагрузка на штамповый инструмент;
Скорость деформирования	в большую сторону	неламинарное течение с захватом воздуха и оксидной плёнки;
	в меньшую сторону	незаполнение полости штампа;

Выбор той или иной стратегии управления зависит от материала заготовки, требуемого соотношения количества твёрдой/жидкой фазы в заготовке на момент начала деформирования, геометрии поковки, конструкции штампа, технических возможностей применяемого оборудования.

Материал и требуемое соотношение количества твёрдой/жидкой фазы в нагретой заготовке определяют температурный диапазон штамповки. Это, так называемое температурное окно тиксоштамповки, при котором заготовка в момент деформирования может вести себя как вязкая суспензия, имеет крайне узкий интервал

значений. Например, для литейного алюминиевого сплава AlSi7Mg величина температурного окна составляет 580 ± 6 °С, для деформируемого алюминиевого сплава AlMgSi1 - 642 ± 2 ° [1], для стального сплава X210CrW12 - 1290 ± 10 ° [2].

Важным условием нагрева является недопущение больших колебаний температуры в процессе нагрева. Незначительный перегрев заготовки приводит к увеличению содержания жидкой фазы и, соответственно, изменению реологических свойств поковки, частичному оплавлению заготовки. Это оказывает влияние как на характер течения металла в полости штампа, так и на механические и качественные характеристики поковки. Недостаточный нагрев может стать причиной потери заготовкой свойств жидкотекучести и незаполнению полости штампа. Требование к количественному содержанию твёрдой фазы в заготовке ещё больше сужает температурное окно штамповки. На рис. 1. представлен температурный диапазон нахождения алюминиевой заготовки AlSi7Mg в твёрдожидком состоянии и рекомендуемый температурный диапазон для тиксштамповки.

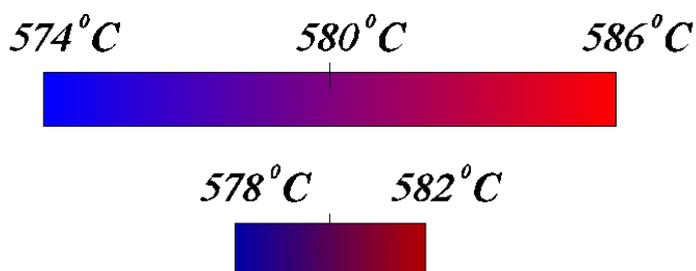


Рис. 1. Температурный диапазон нахождения алюминиевой заготовки AlSi7Mg в твёрдожидком состоянии и рекомендуемый температурный диапазон для тиксоштамповки

Как видно из рис. 1, диапазон варьирования температурой заготовки в случае использования рекомендованных температур для тиксоштамповки значительно сокращается. Вместе с тем необходимо учитывать допускаемый диапазон колебаний температуры и точность нагрева, обеспечиваемые самим нагревательным устройством. Поэтому при выборе стратегии управления заготовкой, важно точно оценить возможность и целесообразность варьирования температурой заготовки в зависимости от ширины температурного окна и точности нагрева, обеспечиваемой оборудованием.

Скорость деформирования определяет время протекания процесса формоизменения и, соответственно, время контакта твёрдожидкого металла с поверхностью штампа. Вследствие того, что температурное окно нахождения заготовки в твёрдожидком состоянии имеет узкий интервал значений, время возможности полного заполнения полости штампа металлом до его кристаллизации имеет также незначительную величину.

С этой точки зрения целесообразным является применение высокой скорости деформирования для быстрого заполнения всей полости штампа, прежде чем температура заготовки опустится ниже линии солидус.

Нагретая заготовка, обладающая свойствами тиксотропности, во время формоизменения проявляет свойства жидкотекучести. При этом скорость деформирования определяет характер течения твёрдожидкого металла. В зависимости от её величины он может быть ламинарным или турбулентным. Это условие ограничивает возможности по увеличению скорости деформирования, поскольку возникновение турбулентных потоков во время течения металла крайне негативно сказывается на качестве поковки. Такой эффект приводит к захвату воздуха металлом и, как следствие, возникновению большого количества пор, проникновению оксидной плёнки с поверхностных слоёв заготовки во внутренние области поковки.

После установки нагретой заготовки в штамп, скорость приближения деформирующего инструмента должна иметь максимальную величину. Это вызвано необходимостью сократить время контакта заготовки со штампом, так как градиент температур между заготовкой и инструментом приводит к быстрому подстыванию поверхности заготовки. Однако перед соприкосновением верхнего штампа с заготовкой необходимо снижение скорости до величины, недопускающей возникновения эффекта разбрызгивания. После касания и начала деформирования скорость может быть увеличена либо снижена до требуемого значения в зависимости от условий штамповки (геометрии поковки, материала заготовки, температуры заготовки и штамповой оснастки).

Наиболее благоприятная кинематика ползуна при штамповке твёрдожидкого металла представлена на рис. 2.

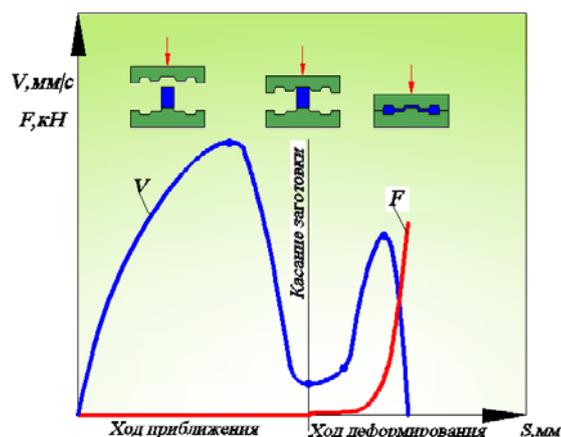


Рис. 2. Кинематика движения ползуна при штамповке металла в твёрдожидком состоянии

Интервалы варьирования скорости деформирования значительно шире в сравнении с интервалом варьирования температуры заготовки. Кроме того, технические возможности по реализации гибкости в управлении скоростью движения ползуна прессы выше. Однако следует также учитывать и геометрические особенности штамповой оснастки, где возможны места резкого изменения площади поперечного сечения. Это может привести к неравномерной скорости потока металла в различных областях штампа. Так что при неизменной скорости деформирования в штампе возможно возникновения одновременно и ламинарного, и турбулентного потоков, что может привести к снижению эффективности управления скоростью деформирования.

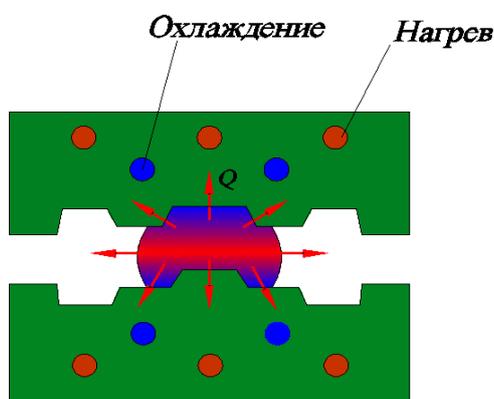


Рис. 3. Схема теплопередачи между заготовкой, окружающей средой и штампом

Температура нагрева штамповой оснастки в тиксотехнологиях имеет значительное влияние на процесс течения металла в штампе и, соответственно, на качественные характеристики поковки. Нагрев связан с необходимостью предотвратить преждевременное подстывание заготовки в штампе.

При контакте с более холодной штамповой оснасткой, заготовка быстро остывает, теряя при этом свойства жидкотекучести (рис. 3). Это может привести либо к значительному увеличению силы деформирования, что негативно сказывается на износостойкости инструмента, либо к незаполнению полости штампа. Особенно это важно учитывать при штамповке поковок, имеющих большую площадь контакта с поверхностью штампа или продолжительное течение. Таким образом, нижняя граница интервала температур нагрева штамповой оснастки ограничивается возможностью заполнения штампового пространства металлом. Верхняя граница диапазона не должна превышать температуры, при которой смазывающие материалы штампа теряют свои свойства. В общем случае максимальная температура нагрева инструмента благоприятствует заполнению штампового пространства, в особенности если поковка имеет сложную геометрию. Однако здесь следует учитывать, что с увеличением температуры нагрева штампа увеличивается время кристаллизации деформированного металла и, соответственно, время охлаждения. В свою очередь увеличение продолжительности кристаллизации значительно повышает вероятность возникновения ликваций в металле, что негативно сказывается на качественных характеристиках поковки. С этой точки зрения желательным является увеличение градиента температур между заготовкой и штампом после окончания деформирования. Поэтому на практике в случае необходимости быстрого охлаждения поковки используется штампы, обладающие возможностью как контролируемого нагрева, так и контролируемого охлаждения. Как правило для этого применяются следующие системы [3]:

- электрические нагревательные патроны;
- электрические нагревательные патроны в комбинации с водяным охлаждением;
- прямой нагрев пламенем;
- системы нагрева/охлаждения с использованием воды, пара или минерального масла.

При использовании температуры штампа в качестве управляемого параметра следует учитывать высокую инерционность нагрева и охлаждения штампов. Это может снизить оперативность регулировки и потребовать изменения временного цикла штамповки.

Табл. 2. Стратегии управления и ограничения в их использовании

Стратегия управления	Ограничения в использовании выбранной стратегии
Управление заготовкой (температура нагрева заготовки)	- узкий интервал температурного окна штамповки; - жёсткие требования к количественному содержанию твёрдой/жидкой фазы в объёме заготовки перед деформированием
Управление оборудованием (скорость деформирования);	- высокое содержание жидкой фазы в объёме заготовки перед деформированием; - наличие резких изменений в площади поперечного сечения полости штампа
Управление штамповым инструментом (температура нагрева штампового инструмента);	- температура нагрева близка с температуре, при которой изменяются свойства смазывающего вещества; - высокая металлоёмкость штамповой оснастки и, как следствие, высокая инерционность нагрева и охлаждения.

Выбирая стратегию управления, необходимо подробно изучить, насколько эффективен тот или иной способ регулировки для получения высококачественной поковки при заданных условиях штамповки, позволяет ли и насколько точно регулировать выбранный параметр используемое оборудование. Использование описываемых стратегий управления имеют ограничения, представленные в табл. 2.

При регулировании параметров штамповки в соответствии с выбранной стратегией важно знать, какова степень взаимовлияния этих параметров. Например увеличение температуры нагрева заготовки влечёт за собой повышение содержания жидкой фазы. Жидкотекучесть заготовки повышается, и, соответственно, без корректировки величины скорости деформирования, возрастает возможность формирования турбулентных потоков или эффекта разбрызгивания при соприкосновении штампа с заготовкой. Понижение температуры заготовки, наоборот, уменьшает вероятность возникновения турбулентного потока и разбрызгивания, но вместе с тем может привести к началу кристаллизации твердожидкого металла до момента заполнения полости штампа. В таком случае корректировка скорости в большую сторону позволяет сократить время контакта твердожидкого металла с более холодным штампом. Недостаточный нагрев штамповой оснастки также способствует быстрому остыванию металла заготовки. Однако в данном случае варьирование скоростью деформирования необходимо проводить с учётом температуры заготовки. Нужно учитывать, что увеличение скорости деформирования без снижения температуры заготовки ограничивается возникновением описанных выше эффектов.

В таких случаях целесообразно использование двойных или тройных стратегий управления. С одной стороны это значительно увеличит общую управляемость и гибкость процесса штамповки, с другой - усложнит сам процесс управления. В силу сложности построения математической модели и алгоритма работы, такая система управления не всегда будет оправданной, так как её усложнение может привести к увеличению вероятности возникновения ошибок.

Возможности выбора стратегии управления в тиксотехнологиях широкие. Стратегию управления следует выбирать в зависимости от материала заготовки, геометрии поковки, конструкции штампа, требования к соотношению твёрдой/жидкой фазы в нагретой заготовке, технических возможностей применяемого оборудования. Однако при оценке выбранной стратегии следует принимать во внимание не только качественные характеристики полученной поковки, но и соотношение стоимость/эффективность работы, так как регулирование отдельных параметров штамповки может потребовать применения дорогостоящего и сложного оборудования.

Литература

1. *Klaus Siegert; Günther Messmer; Jens Baur; Andreas Wolf*: Thixoschmieden von Aluminiumbauteilen; Tagungsband zur 7. Sächsischen Fachtagung Umformtechnik; 24 – 25. Oktober 2000; Chemnitz
2. Sonderforschungsbereich 289: Formgebung metallischer Werkstoffe im teilerstarten Zustand und deren Eigenschaften; RWTH Aachen; Arbeits- und Ergebnisbericht 2002/2003/2004
3. *Meßmer, G.*: Gestaltung von Werkzeugen für das Thixo-Schmieden von Aluminium und Messinglegierungen in automatisierten Schmiedezellen. Beiträge zur Umformtechnik Nr. 54. Frankfurt/M.: MAT-INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft, 2006. ISBN 3-88355-355-7.

УДК 621.73.06

КОНСТРУКЦИЯ ШТАМПА С РАЗЪЕМНЫМИ МАТРИЦАМИ ДЛЯ ШТАМПОВКИ ДЕТАЛИ «ОБОЙМА» НА КРИВОШИПНОМ ГОРЯЧЕШТАМПОВОЧНОМ ПРЕССЕ

Надежда Николаевна Лабанова

*Студентка 6 курса,
кафедра «Технологии обработки давлением»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Е.Н. Складчиков,
доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии обработки давлением»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

В настоящее время все больше внимания уделяется решению ресурсосберегающих и энергосберегающих технологий в отраслях машиностроения. Преимущества безоблойной штамповки, проявляющиеся при замене ею облойной, следующие: повышение коэффициента использования материала на 0,1...0,25 вследствие уменьшения расхода металла на одну поковку. Но при закрытой штамповке часто возникают такие проблемы как извлечение поковки из полости штампа. Общее направление развития штамповочных процессов характеризуется созданием множества конструкций сборных блоков закрытых штампов. Особое место среди них занимают штампы с разъемными матрицами, позволяющие резко сократить технологические отходы при производстве изделий с высокоразвитой поверхностью (переходники, обоймы и др.). В данной работе представлена конструкция штампа с разъемными матрицами для штамповки поковки «Обойма» (рис. 1). Особенностью данной поковки является наличие ответвлений, необходимых для размещения в них крепежных элементов. Технологический процесс изготовления поковки представлен на рис. 2.

Как видно из чертежа (рис. 1), отношение высоты данной поковки к ее диаметру превышает обычное при штамповке в закрытых штампах, следовательно, извлечение поковки из полости штампа будет затруднено.

Для решения данной проблемы была разработана конструкция штампа последовательного действия с разъемными матрицами (рис. 3). Штамп имеет сборную конструкцию, благодаря чему упрощается изготовление сменного инструмента и создаются условия для экономии дорогих инструментальных сталей. Штамп состоит из штамповых вставок, в которых располагаются ручки, и пакетов, в которых закрепляют вставки. Разъемные матрицы приводятся в движение двумя клиньями: прямым и обратным. Одной из проблем при проектировании данного штампа было соблюдение размеров клиньев. Так как клин 2 должен успеть уйти до того как клин 1 начнет раздвигать матрицы (рис. 3).

При проектировании штампов с разъемными матрицами возникает вопрос – хватит ли силы прижимы клина 2 для того, чтобы удерживать матрицы сомкнутыми во время процесса деформирования. Расчет клина на контактные напряжения и на горизонтальное перемещение был произведен с помощью программного комплекса AnsysWorkbench.

С помощью функции Mesh данная модель была разбита на конечные элементы, а радиус скругления в матрице и место контакта между клином и матрицей было измельчено с помощью функции Refinement (рис. 5).

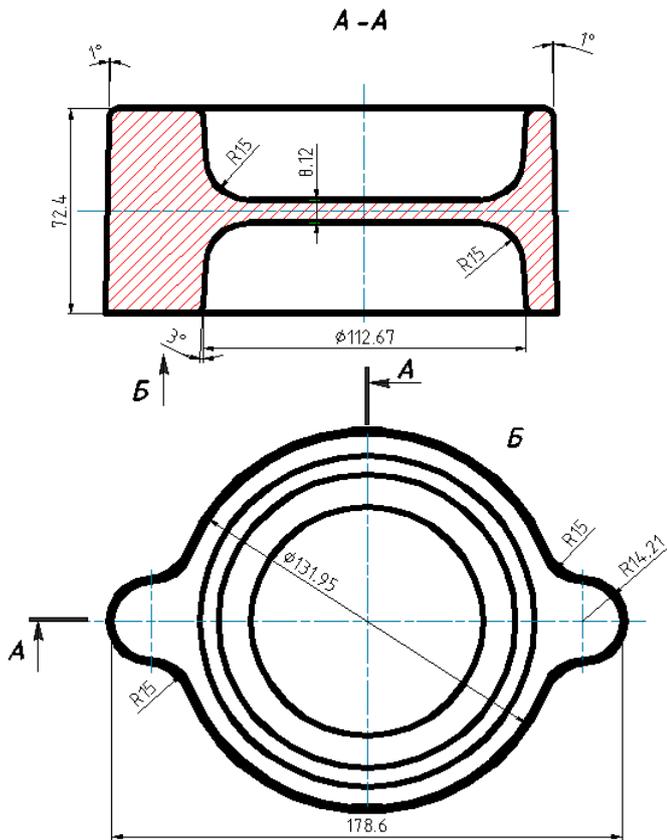


Рис. 1. Чертеж поковки «Обойма»

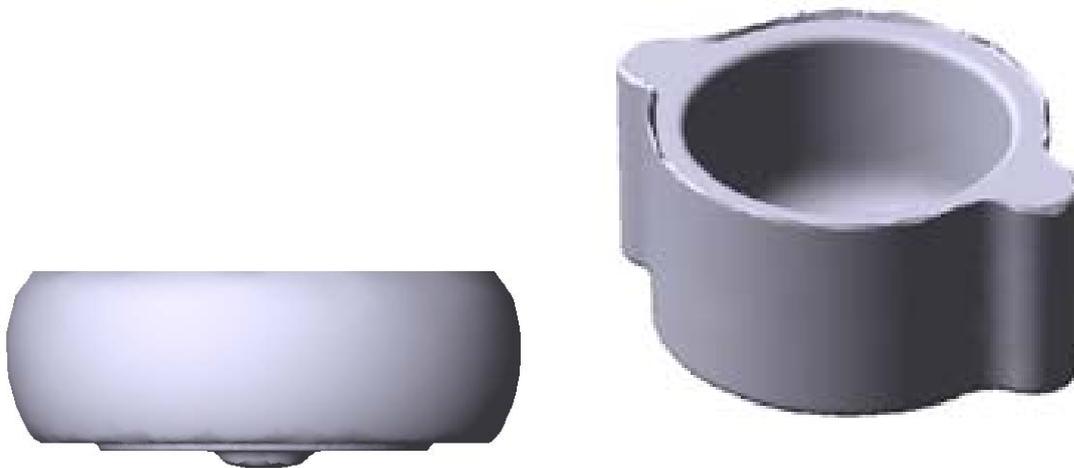


Рис. 2. Технологический процесс получения поковки (1-осадка, 2-штамповка, 3-прошивка отверстия)

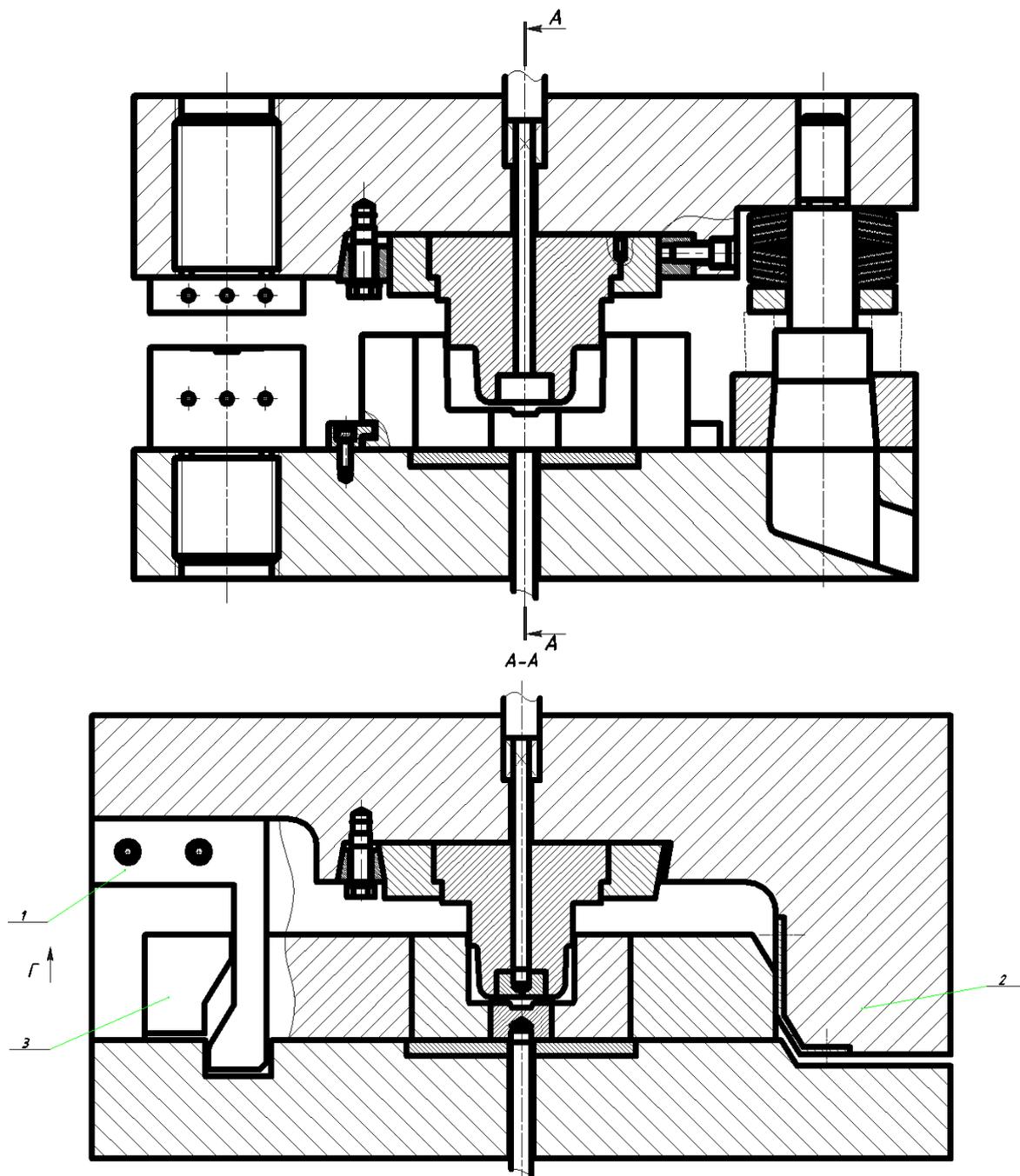


Рис. 3. Штмп последовательно действия с разъемными матрицами
(при ходе ползуна вниз, прямой клин 2 сжимает полуматрицы 3.
При обратном ходе обратный клин 1 раздвигает полуматрицы)

Для моделирования процесса были взяты данные из программного QForm (напряжения на внешней поверхности поковки). Так же было учтено, что для моделирования применялась только половина детали (рис. 6).

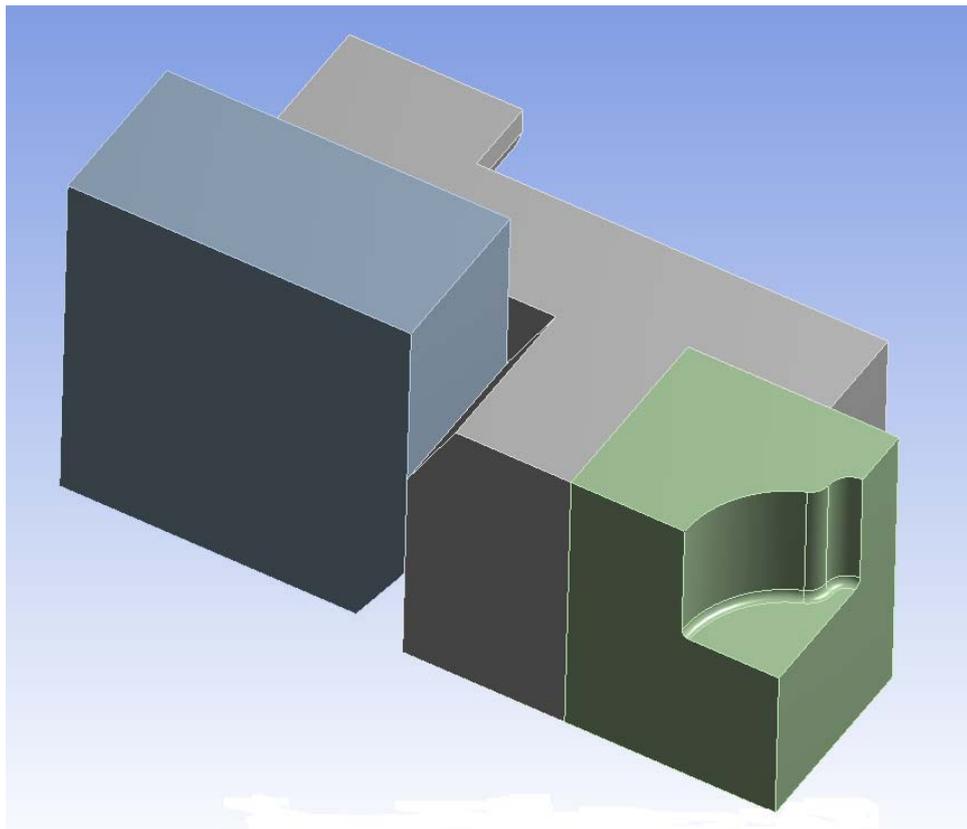


Рис. 4. 3D модель матрицы вместе с клином

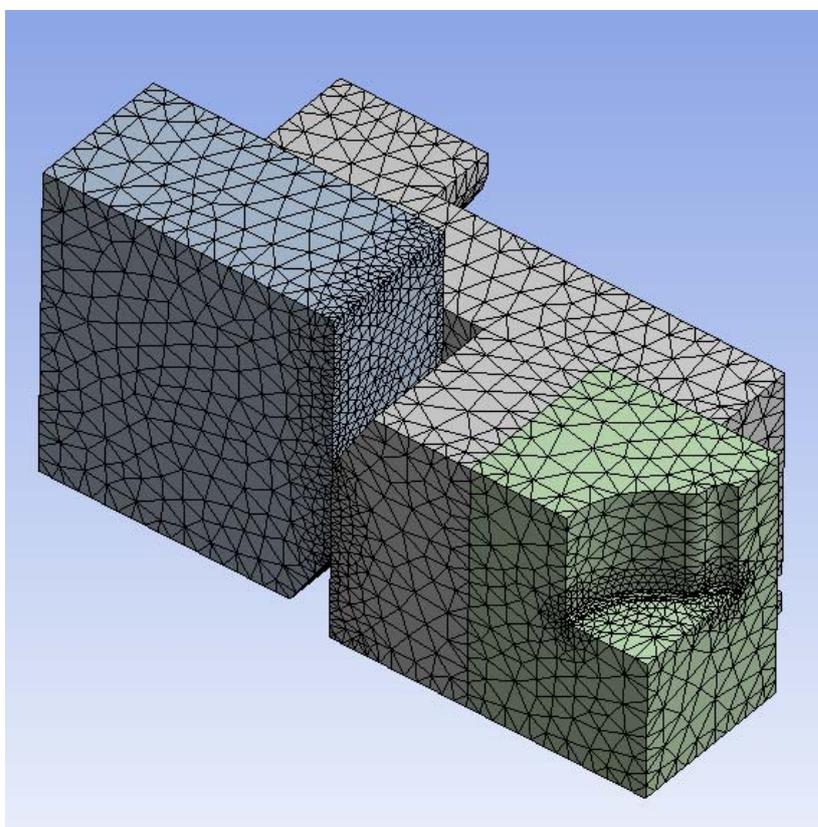


Рис. 5. Сетка разбиения

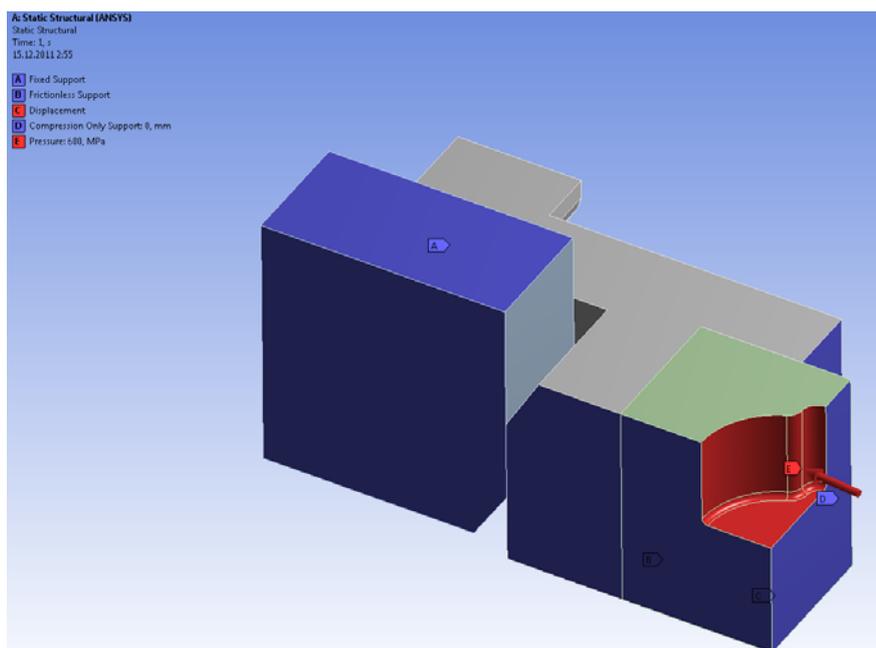


Рис.6. Приложение внешних сил

Результаты моделирования можно увидеть на рис. 7.

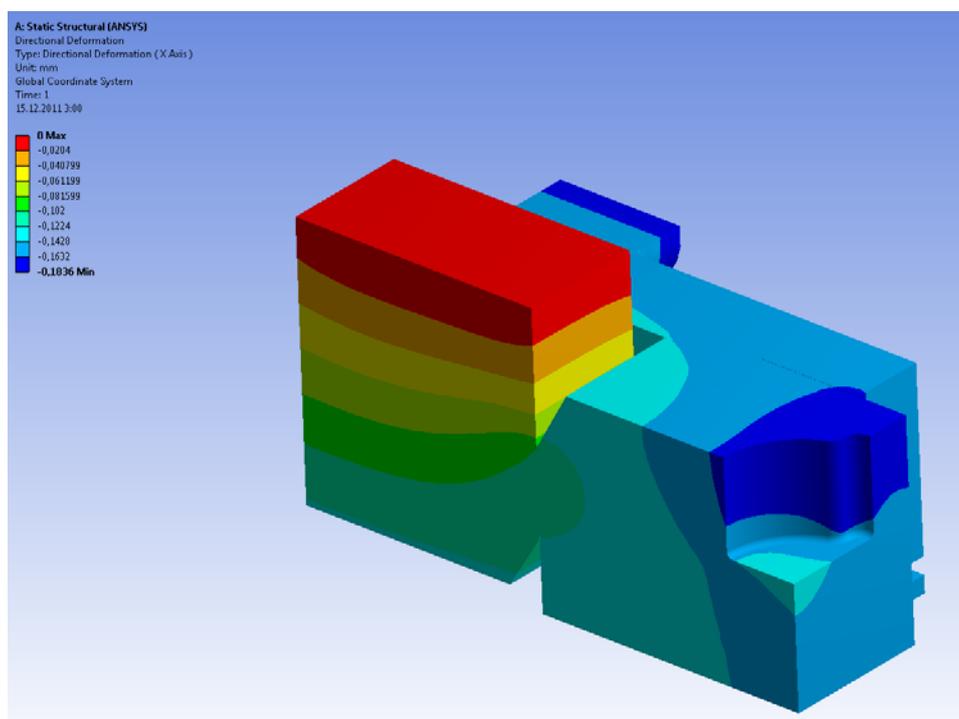


Рис. 7. Перемещение по оси X

По результатам моделирования видно, что перемещение вместе контакта матрицы и пуансона составляет 0,102. Так как при моделировании мы использовали только 1/2, то полученный результат необходимо умножить на 2. Тогда мы имеем горизонтальное перемещение 0,2 мм. При ГОШ это допустимо. Из данного моделирования можно сделать вывод, что данный клин обеспечивает достаточное сжатие матриц.

Выводы:

1. Предлагаемая конструкция штампа обеспечивает беспрепятственное извлечение поковки из полости штампа.
2. Штамп имеет сборную конструкцию, благодаря чему упрощается изготовление сменного инструмента.
3. Штамп обеспечивает надежное сжатие матриц во время процесса деформирования и разжимание их при обратном ходе.

Литература

1. *И.С. Зиновьев, В.Г. Кондратенко, А.В. Чередниченко.* Методические указания к домашнему заданию по курсу «Технология горячей объемной штамповки». - М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1987.
2. *Е.И. Семенов.* Ковка и штамповка. Справочник. 2 том. - М: Машиностроение, 1987.
3. *А.А. Скворцов, А.Д. Акименко, М.Я. Кузелев.* Нагревательные устройства. - М: «Высшая школа», 1965.
4. *В.А. Бабенко.* Атлас схем и типовых конструкций штампов. - М: «Машиностроение», 1982.
5. Конспект лекций по курсу: «ГОШ». 2009 – 2010 уч. год.

УДК 621.7

ЗАДАЧА УМЕНЬШЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ РАДИУСА ЗОН СГИБА ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ ИЗ ЛИСТОВ АВИАЦИОННОГО СПЛАВА В95пчАМ

Валерия Владимировна Марковцева

*Студентка 5 курса,
кафедра «Материаловедение и обработка металлов давлением»,
Ульяновский государственный технический университет*

*Научный руководитель: В.И. Филимонов,
доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение и обработка металлов давлением»,
Ульяновский государственный технический университет*

Возросшие требования к современным летательным аппаратам в отношении прочности, жесткости, надежности, долговечности, весовой отдачи элементов конструкций вызывают необходимость применения профилей, получаемых методом стесненного изгиба из листовых заготовок высокопрочных сплавов. Важной характеристикой готовых изделий – гнутых профилей, является величина радиуса зон сгиба, напрямую влияющая на жесткость самих профилей и, как результат, жесткость получаемых конструкций.

В данной статье рассматриваются гнутые профили из авиационного сплава В95пчАм. Общеизвестным является факт ограничения получаемого радиуса зон сгиба гнутых профилей из данного сплава до $2s$ (где s – толщина материала) по действующим техническим рекомендациям Т.Р.1.4.1780-87. Однако до настоящего времени остается

актуальной проблема снижения величины радиуса зон сгиба и получение при этом бездефектных профилей повышенной жесткости.

Целью данной работы явилось исследование величины прогиба профиля в зависимости от значения радиуса сгиба, повышение жесткости гнутых профилей из сплава В95пчАМ.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Смоделировать процесс изготовления профиля из сплава В95пчАМ с помощью программного продукта ANSYS LS-DYNA.
2. Применить на практике полученные теоретические результаты.

В последние годы наметилась тенденция к увеличению номенклатуры гнутых профилей, изготавливаемых методом стесненного изгиба в различных отраслях промышленности. Применение таких профилей позволяет устранить конструктивно-технологические ограничения, возникающие при использовании профилей, получаемых горячей прокаткой, прессованием, гибкой в штампах и на кромкогибочных машинах. Например, увеличивается ресурс работы изделия за счет лучшего качества поверхности, наличия покрытия, в том числе лакирующего слоя; расширяется сортамент профилей за счет использования новых перспективных материалов с улучшенными физико-механическими свойствами (новые алюминиевые сплавы, композиционные материалы); снижается масса изделий за счет повышения точности размеров и формы получаемых профилей (ликвидации плюсовых допусков). В технологическом отношении производство гнутых профилей методом интенсивного деформирования в роликах обеспечивает следующие преимущества: снижение энергетических затрат, стоимости инструмента; уменьшение отходов материала; возможность изготовления малых партий изделий при быстрой окупаемости процесса (высокой мобильности), более рациональное использование производственных площадей.

В изделиях гражданской авиации нового поколения предусматривается применение гнутых алюминиевых профилей в качестве деталей стрингерного набора, являющихся ответственными по своему назначению и несущих значительную силовую нагрузку.

В исследовании рассматривается изготовление гнутых профилей из материала В95пчАМ. Сплав В95пчАМ (повышенной чистоты с лакировкой алюминием, в отожженном состоянии), представляет собой один из наиболее прочных сплавов, широко применяется при изготовлении гнутых профилей. Сплав относится к четырехкомпонентной системе Al-Zn-Mg-Cu, интенсивно упрочняется термической обработкой. Полуфабрикаты из сплава В95 поставляются только в закаленном и искусственно состаренном состоянии. Это объясняется тем, что в естественно состаренном состоянии сплав В95 имеет пониженную коррозионную стойкость. Поскольку листы из них используются в конструкционных целях, то для коррозионной защиты они лакируются слоем технического алюминия. Сплав В95 хорошо сваривается точечной сваркой, но не сваривается аргонодуговой и газовой. Поэтому для соединения полуфабрикатов (толстых листов, профилей и панелей) наиболее часто применяют заклепочные соединения. Кроме авиационной промышленности, являющейся основным потребителем гнутых профилей из сплава В95пчАМ, он широко применяется в судостроении, электротехнической промышленности, радиотехнике, в строительстве.

Табл. 1. Механические свойства сплава В95пчАМ

σ_B , МПа	σ_{02} , МПа	δ , %
500-520	420-450	7-8

Табл. 2. Химический состав сплава В95пчАМ

Fe, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	Ti, %	Al, %	Cu, %	Mg, %	Zn, %	Примесей, %
до 0,5	до 0,5	0,2... 0,6	0,1... 0,25	до 0,05	86,2... 91,5	1,4... 2,0	1,8... 2,8	5...7	Прочие, каждая 0,05, всего 0,1

Для оценки возможности получения стрингерного профиля с радиусом сгиба $1,5s$ в роликах из материала В95пчАМ проводилось моделирование процесса с помощью программного продукта Ansys LS-Dyna.

Цель моделирования – установить зависимость величины прогиба профиля от значений радиуса и прикладываемого усилия. Для определения требуемых параметров была спроектирована модель гнутого профиля (рис. 1), один конец которого жестко закреплен. На свободный конец прикладывается усилие (50Н, 100Н, 200Н, 400Н и 800Н). Значения радиусов составляли от $1s$ до $5s$ (где s – толщина материала). В нашем эксперименте $s=1,5$ мм. Эксперимент проводился для каждого значения радиуса и усилия. Полученные результаты представлены в табл. 3 (значения прогиба профиля в миллиметрах, мм) и в табл. 4 (значения прогиба профиля в процентах, %).

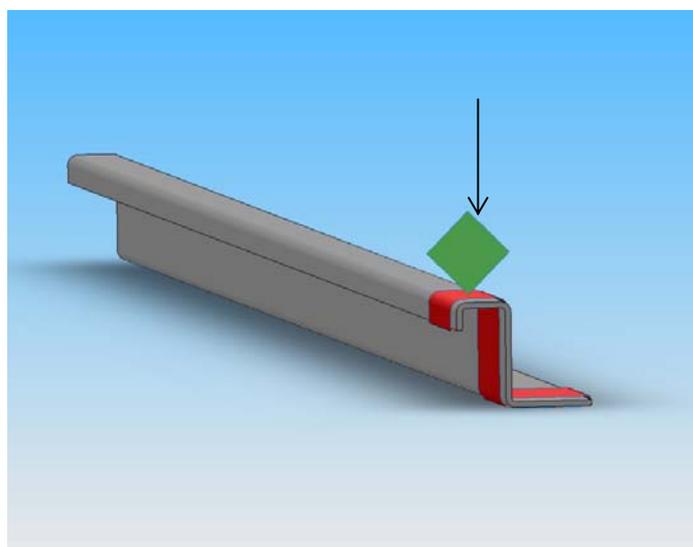


Рис. 1. Модель профиля «шпангоут» при исследовании величины прогиба

Моделирование в программе LS-Dyna позволило с большой точностью определить все необходимые параметры для разработки оптимальной технологии, путем определения напряженно-деформированного состояния в любой точке профиля с любой момент времени деформирования. В процессе моделирования в случае превышения необходимой величины по пластической деформации существует возможность остановить процесс в любой момент движения заготовки и быстро изменить режимы профилирования и продолжить выполнение расчета с измененными параметрами процесса.

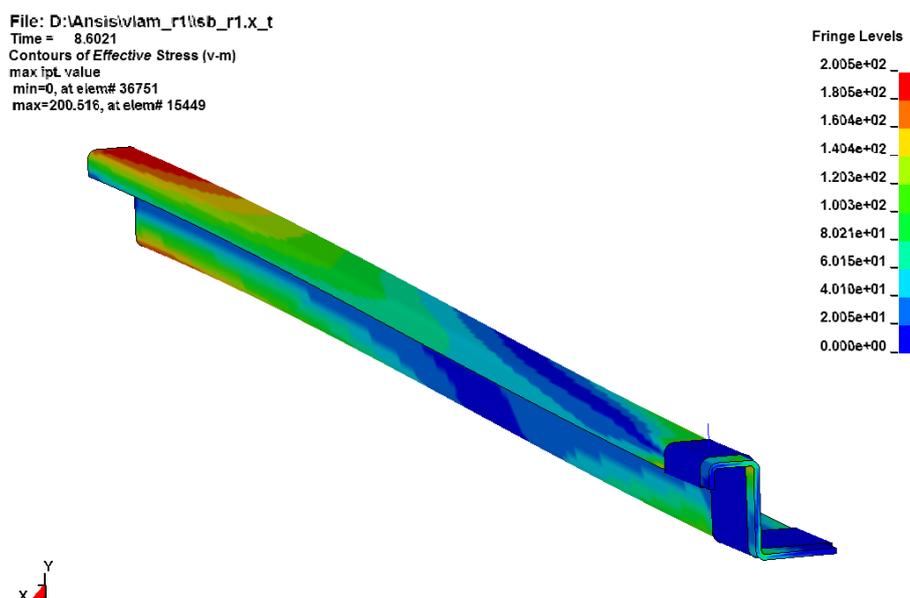


Рис. 2. Распределение напряжений по поверхности модели профиля

В LS-Dyna были также определены и энергосиловые параметры процесса с целью оптимального подбора оборудования и обеспечения нужного теплового режима профилирования (рис. 2).

Табл. 3. Зависимость прогиба от усилия и радиуса
 (в относительных единицах, мм)

F,Н \ R	R=1s	R=2s	R=3s	R=4s	R=5s
50	2,94	3,06	3,16	3,27	-
100	5,81	5,98	6,21	6,44	6,7
200	9,3	9,59	10	10,31	10,58
400	-	15,3	16,3	17,05	17,9
800	-	26,2	26,5	-	27

Таблица 4. Зависимость прогиба от усилия и радиуса
 (в абсолютных единицах, %)

F,Н \ R	R=1s	R=2s	R=3s	R=4s	R=5s
50	0	4,08	7,48	11,22	-
100	0	2,92	6,88	10,84	15,31
200	0	3,11	7,52	10,86	13,76
400	0	4,93	11,79	16,94	22,77
800	0	-	-	-	-

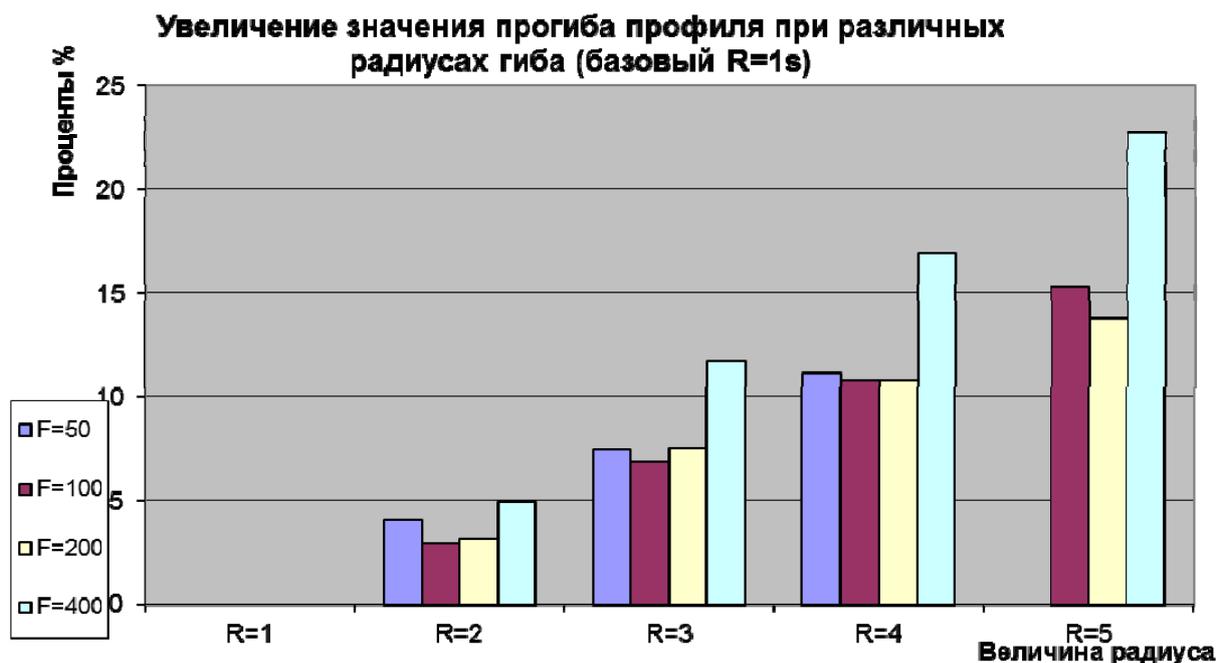


Рис. 3. Диаграмма зависимости значения прогиба от радиуса и прикладываемого усилия (по табл. 4)

В соответствии с табл. 4 построена диаграмма (рис. 3), на которой за базовый параметр принята относительная величина прогиба 0% при базовом радиусе R=1s.

Анализируя полученные результаты, отображенные на диаграмме, можно сказать, что с увеличением радиуса и прикладываемого усилия значение прогиба увеличивается, т.е. снижается жесткость изделия. Так, при усилии 100 Н разница значений прогиба при R=1s и R=5s составляет более 15%. Теоретически, положительный эффект при этом – снижение на 15% массы конструкции, изготовленной из гнутых профилей такого вида.

На предприятии ОАО «Ульяновский НИИТ» освоена технология производства авиационных профилей из алюминиевого сплава В95пчАМ методом стесненного изгиба, с радиусом сгиба, равным 1,5s и утолщением зон сгиба до 10%.

Технология стесненного изгиба и оборудование для его осуществления длительно совершенствовались с учетом применения в авиастроительной промышленности. При использовании указанного метода выполняются требования по качеству профилей, быстрой и высокоточной переналадке оборудования, возможности изготовления на одном станке широкой номенклатуры профилей, простоте и надежности оборудования, его безотказности, ремонтпригодности и т. п.

На рис. 4 изображена конфигурация полученных профилей методом стесненного изгиба. При входном контроле листов дефекты не обнаружены. После формообразования был произведен контроль микроструктуры профилей. Исследование проводилось при увеличении в 250 раз на металлографическом микроскопе МИМ-8м. Микроструктура внутренней и внешней поверхностей без дефектов, представлена на рис. 5, а и 5, б соответственно. Структура готовых изделий по сечению аналогична структуре исходного материала.

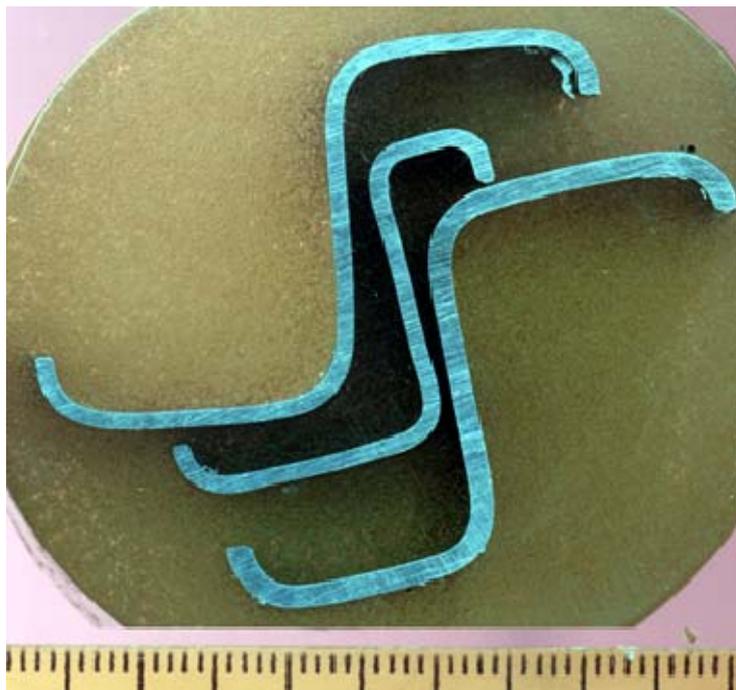


Рис. 4. Конфигурация полученных профилей из сплава В95пчАМ

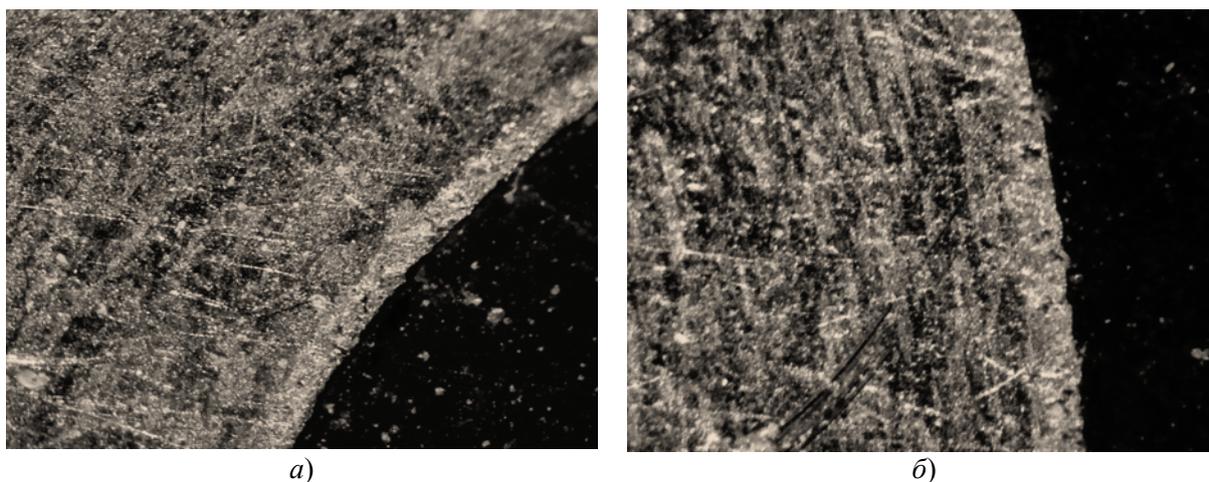


Рис. 5. Структура профилей из сплава В95пчАМ по внутренней поверхности (а) и по внешней поверхности (б)

Проведенные комплексные исследования и испытания профилей позволили сделать следующие выводы:

1. Геометрическая точность по сечению профилей соответствует предъявленным техническим требованиям к таким изделиям;
2. Нарушений поверхностного плакированного слоя не наблюдается.
3. Механические и коррозионные свойства профилей находятся в пределах требований ОСТ 1.90125-83 и ОСТ 1.90246-76.

Профили, полученные методом стесненного изгиба, допускают критические напряжения при испытаниях на местную и общую потерю устойчивости на 8...12 % больше, чем профили, полученные обычной гибкой, за счет уменьшения внутреннего радиуса и увеличения толщины материала в зоне сгиба.

Литература

1. Фридляндер И.Н. *Металловедение алюминия и его сплавов.* – М.: Металлургия, 1971. – 352 с.
2. Марковцев В.А., Филимонов В.И., Проскуряков Г.В. *Выбор конструктивных параметров правильного устройства.* // *Авиационная промышленность.* -1988.-№9. -С. 32-35.
3. Марковцев В. А., Филимонов В. И. *Формообразование стесненным изгибом в роликах и правка гнутых тонкостенных профилей.* – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 244 с.
4. Беляев А. И., Бочвар О. С., Буйнов Н. Н. *Металловедение алюминия и его сплавов: Справ. изд. 2-е изд., перераб. и доп.* – М.: Машиностроение, 1983. –280 с.
5. Лысов М.И., Сосов Н.В. *Формообразование деталей гибкой.* – М.: Машиностроение, 2001. – 388 с.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ТРУБОГИБОЧНЫЙ ПРЕСС-АВТОМАТ С УСТРОЙСТВАМИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОДАЧИ И РЕЗЬБОНАРЕЗАНИЯ ТРУБ

Илья Юрьевич Марухин

*Студент 6 курса,
кафедра «Технологии обработки давлением»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: А.С. Езжев,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии обработки давлением»,
Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана*

Целью проекта является разработка высокопроизводительного автомата для изготовления W-образных полотенцесушителей с присоединительной резьбой на концах трубы.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- проведен обзор конструкций трубогибочных станков
- разработана новая технология гибки W-образного полотенцесушителя
- выполнено моделирование процесса в программном комплексе Deform
- разработаны чертежи общих видов всех узлов и механизмов автомата
- в формате 3D разработаны основные виды автомата и анимация его работы

Современные полотенцесушители являются отопительными приборами и элементами декора и находят широкое применение при строительстве нового и реконструкции старого жилья. В связи с все возрастающим объемом жилищного строительства увеличивается и спрос на полотенцесушители. Поэтому актуальными являются вопросы производительности и снижения себестоимости при их производстве. В процессе проведенного обзора автоматов по изготовлению W-образных полотенцесушителей с одновременной нарезкой на них присоединительной резьбы не обнаружено.

В работе выполнен анализ нескольких вариантов технологии изготовления W-образного полотенцесушителя и выбран оптимальный с точки зрения простоты его реализации в автоматическом цикле (рис. 1).

Этот процесс моделировался в программном комплексе DEFORM-3D с целью установления качества получаемой детали и определения технологических параметров, необходимых для проектирования автомата (размеры, силы, перемещения) (рис. 2, 3, 4).

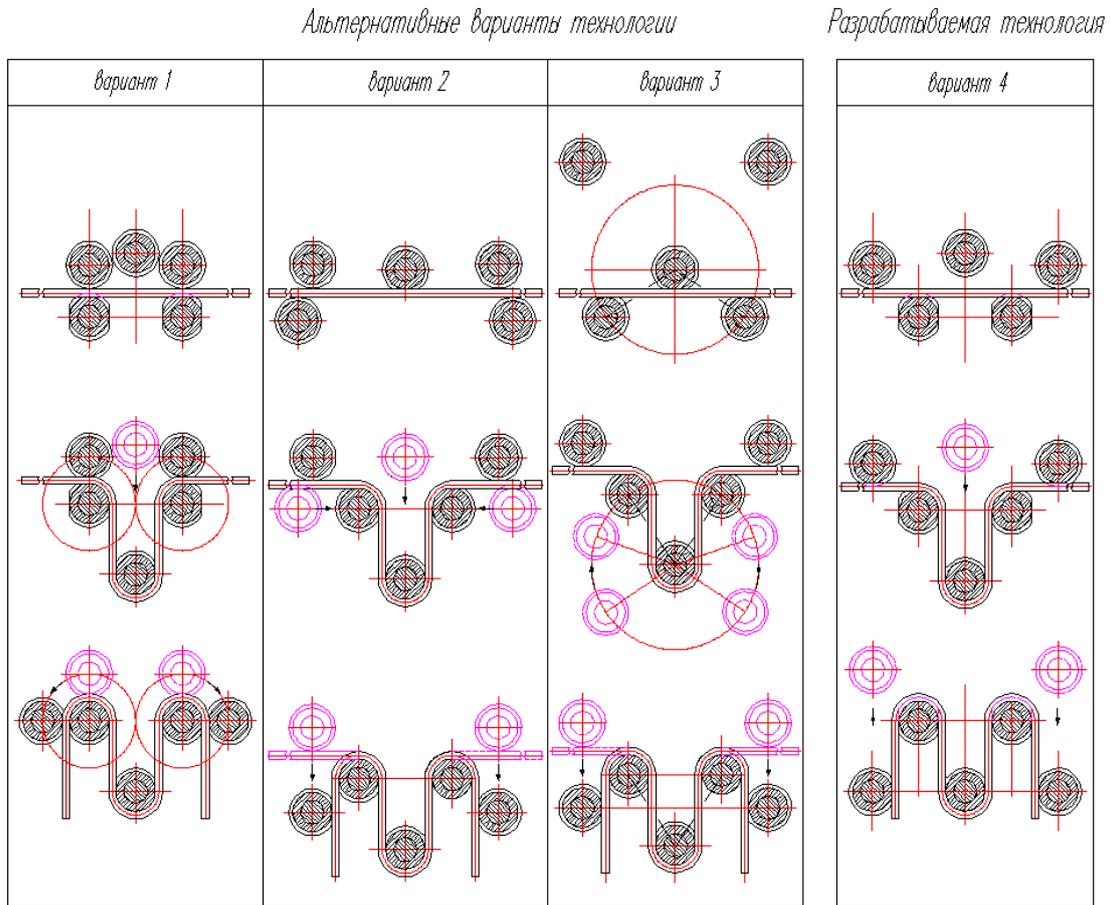


Рис. 1. Варианты технологий

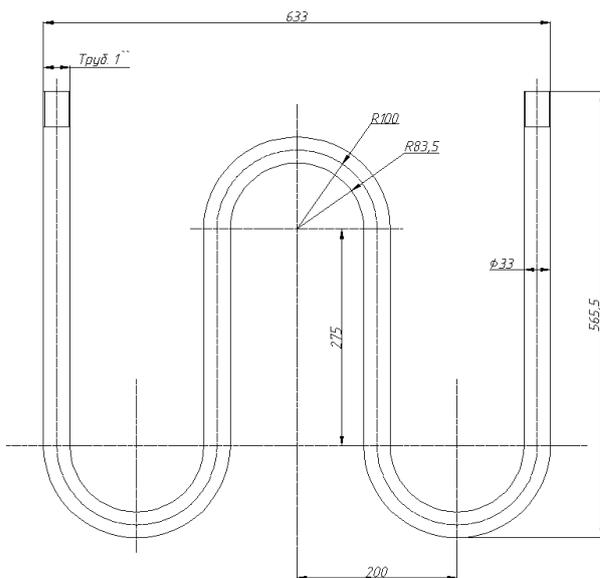


Рис. 2. Изготавливаемый полотенцесушитель

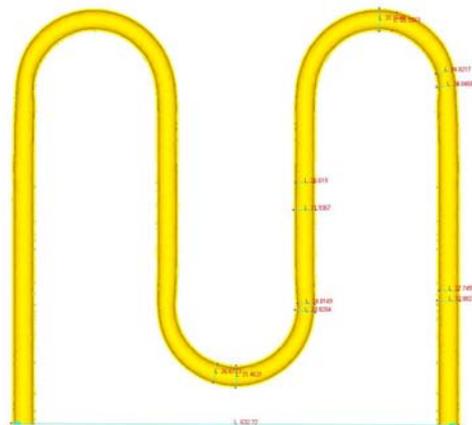


Рис. 3. Результат моделирования

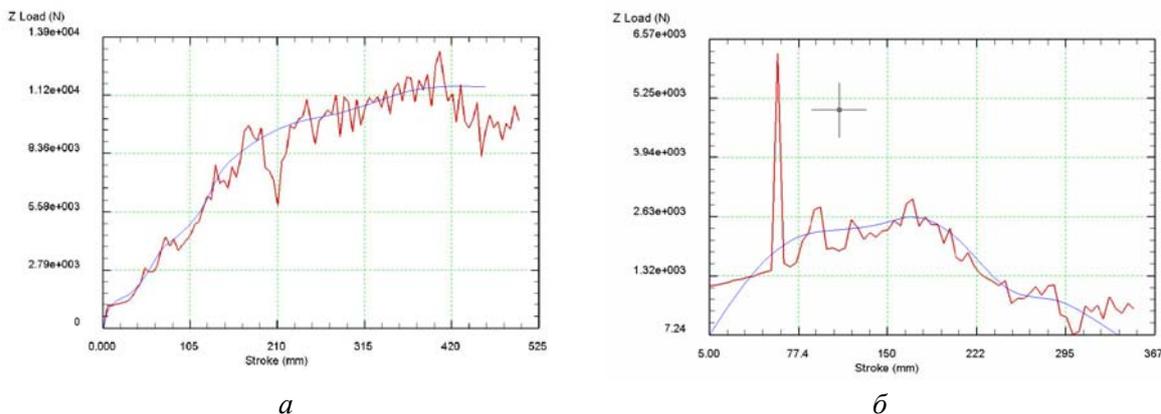


Рис. 4. Графики сила-ход центрального (а) и боковых (б) ползунов

Разработанный пресс-автомат включает в себя автоматизированный стеллаж, на котором размещаются исходные трубные заготовки мерной длины (рис. 5).

Устройство поштучного отделения труб поочередно сбрасывает их на роликовый транспортер, который подает трубу на загрузочную позицию пресс-автомата (рис. 6). Гибка трубы по W-образной форме производится тремя рабочими цилиндрами, на ползунах которых смонтированы гибочные ролики.

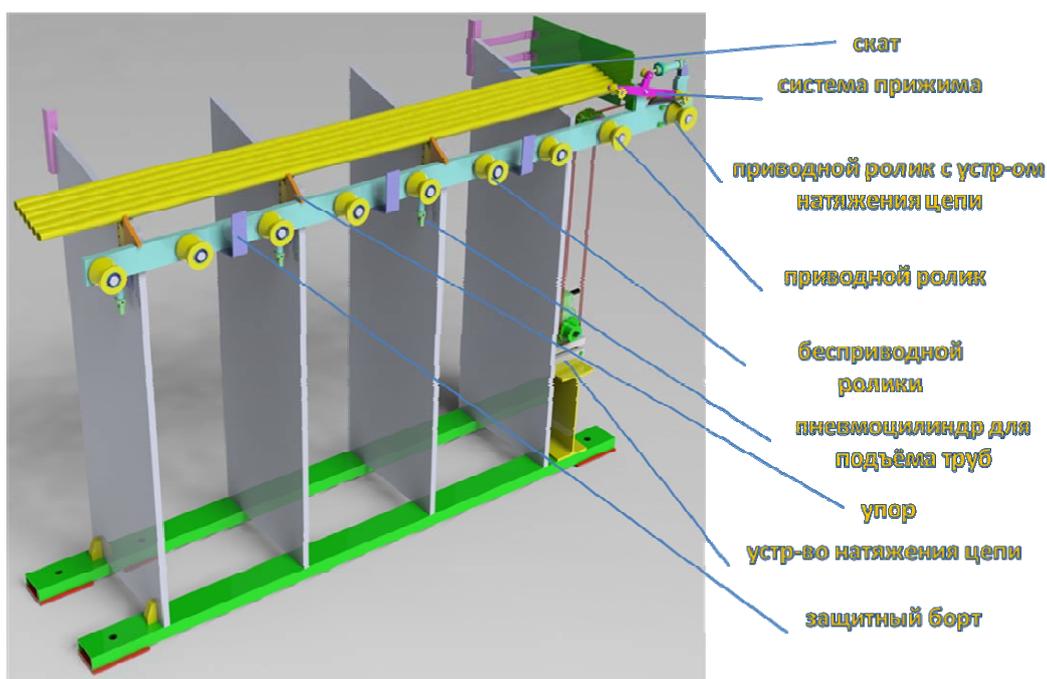


Рис. 5. Общий вид стеллажа

Центральный гидроцилиндр своим роликом производит гибку средней части полотенцесушителя между двумя опорными роликами, закрепленными на станине. При этом концевые части трубы удерживаются роликами боковых гидроцилиндров. После окончания гибки средней части полотенцесушителя включаются на рабочий ход два боковых гидроцилиндра, которые своими роликами гнут концевые части полотенцесушителя относительно опорных роликов станины.

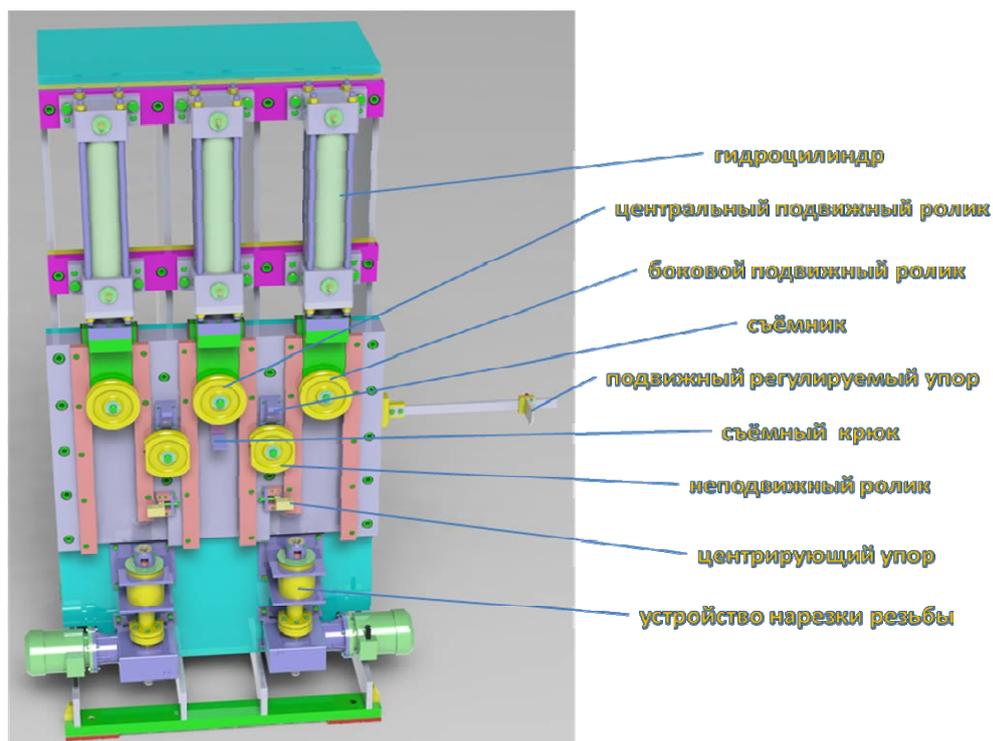


Рис. 6. Общий вид пресса

В конце гибки концевые части полотенцесушителя прижимаются к упорам на станине, чем обеспечивается центрирование концов детали относительно резьбонарезных головок, смонтированных на станине. Включается привод резьбонарезных головок и они производят нарезание резьбы на концах полотенцесушителя. При возвратном ходе среднего цилиндра его ползун приподнимает полотенцесушитель, который наталкивается на клиновые упоры и сбрасывается на стапелирующее устройство (рис. 7). После этого цикл повторяется.

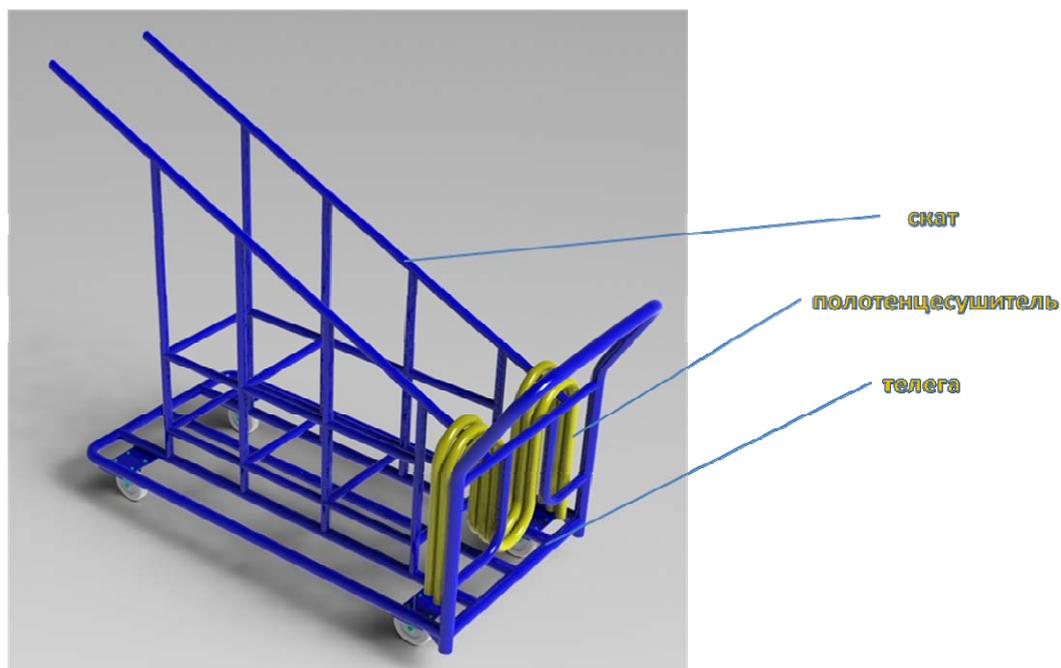


Рис. 7. Общий вид стапелирующего устройства

Особенности работы: Чтобы синхронизировать работу боковых гидроцилиндров, предложена система мониторинга, диагностики и управления. Для разрабатываемого гидравлического пресс-автомата разработана модель в программном комплексе ПА9 на основе гидросхемы машины. В результате получены эталонные графики скорости цилиндров, по которым можно судить о правильности настройки синхронной работы приводов, а так же о наличии потерь в гидросистеме.

Проект выполнен в формате чертежей 3D (рис. 8), что дает наглядное представление о конструкции всех основных узлов и механизмов. Кроме того выполнена анимация работы автомата, которая позволяет наблюдать все движения механизмов в процессе гибки полотенецусушителя и нарезки резьбы на его концах.

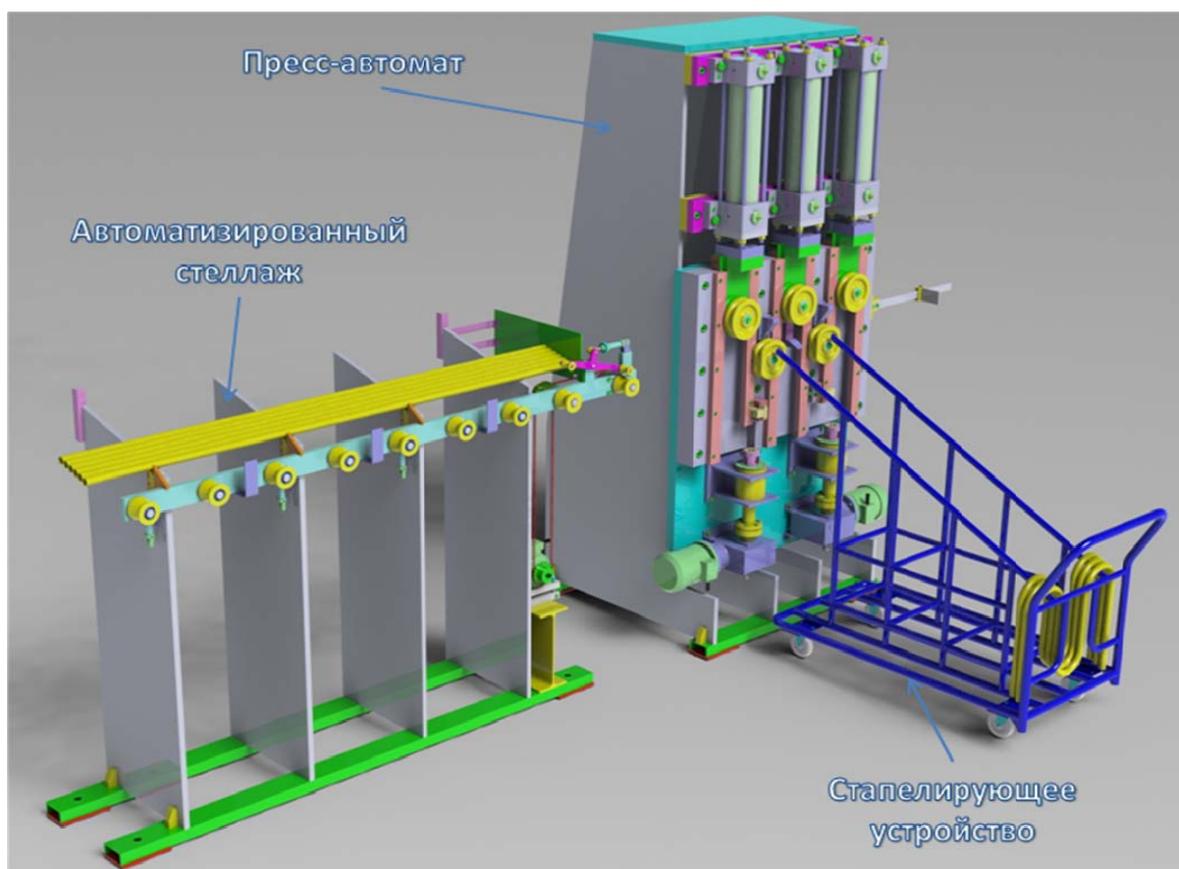


Рис. 8. Общий вид машины

Литература

1. *И.А. Норицын, В.И. Власов.* Автоматизация и механизация технологических процессовковки и штамповки. - М.: Машиностроение, 1967
2. «Каталог, часть 2, редукторы и мотор-редукторы червячные», Санкт-Петербург 1998,
3. *Спиваковский А.О., Дьячков В.К.* Транспортирующие машины. Учеб. пособие для вузов, 3-е изд. – 1983. – 487 с.,
4. *В.А. Марутов, С.А. Павловский.* Гидроцилиндры. Конструкции и расчёт. - М.: Машиностроение, 1966
5. *А.С. Езжев.* Расчёт гидропривода КШМ. Методические указания домашнего задания по курсу «Гидропривод КШМ». – М.: МТГУ им. Н.Э. Баумана, 2008

6. Пакет учебных программ для ЭВМ: Методические указания по дисциплинам «Детали машин» и «Прикладная механика». Часть 1 /Сост. Пахалюк В.И., Зуева Л.В. – Севастополь: Изд-во СевГТУ, 2000.–30с.

7. Дунаев П.Ф. Конструирование узлов и деталей машин: Учеб. пособие для техн. спец. вузов /П.Ф. Дунаев, О.П. Леликов. – М.: Высш. шк., 2000. – 447 с.

8. Киркач Н.Ф. Расчет и проектирование деталей машин: Учеб. пособие для техн. вузов / Н.Ф. Киркач, Р.А. Баласанян.– Харьков: Основа, 1991. – 276 с.

9. Решетов Д.Н. Детали машин /Д.Н. Решетов.– М.: Машиностроение, 1989. – 496с.

10. Кузьмин А.В. Курсовое проектирование деталей машин: Справочное пособие. Часть 1 /А.В. Кузьмин, Н.Н. Макейчик, В.Ф. Калачев и др. – Мн.: Выш. шк., 1982. – 208с.

11. Готовцев А.А. Проектирование цепных передач: Справочник /А.А. Готовцев, Г.Б. Столбин, И.П. Котенко. – М.: Машиностроение, 1973. –376с.

12. Чернавский С.А. Проектирование механических передач: Учеб.- справ. пособие для вузов /С.А. Чернавский, Г.А. Снесарев, Б.С. Козинцов и др. – М.: Машиностроение, 1984.–560с.

13. Иванов М.Н. Детали машин: Учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений / М.Н. Иванов. – М.: Высш. шк., 1991.–383с.

14. Живов Л.И., Овчинников А.Г., Складчиков Е.Н. – Кузнечно-штамповочное оборудование.

УДК 621.77.24

СОПОСТАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ П-ОБРАЗНЫХ КРОНШТЕЙНОВ ПРЕССОВАНИЕМ И ВЫДАВЛИВАНИЕМ

Мария Юрьевна Маштакова

Аспирант 2 года,

кафедра «Технологии обработки материалов»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.Л. Воронцов,

доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии обработки материалов»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

В настоящее время одной из основных задач современной технологии машиностроения является повышение качества получаемых изделий. Наиболее полно эта задача реализуется при использовании процессов, основанных на холодной пластической деформации. К числу наиболее прогрессивных процессов относится холодная объемная штамповка (ХОШ).

ХОШ является высокотехнологичным процессом изготовления деталей и широко используется в мировом машиностроении. Особое место среди операций объемной штамповки занимает выдавливание. Выдавливанием получают детали различной формы и назначения, используя соответствующие способы: прямое выдавливание, обратное, комбинированное, дифференцированное, выдавливание с активными силами трения или комбинации выше приведенных способов.

В современных технологиях обработки давлением П-образные изделия и изделия близкие к ним (рис. 1) получают различными способами: листовой штамповкой (вырубкой, гибкой), сортовой прокаткой, прессованием и выдавливанием.

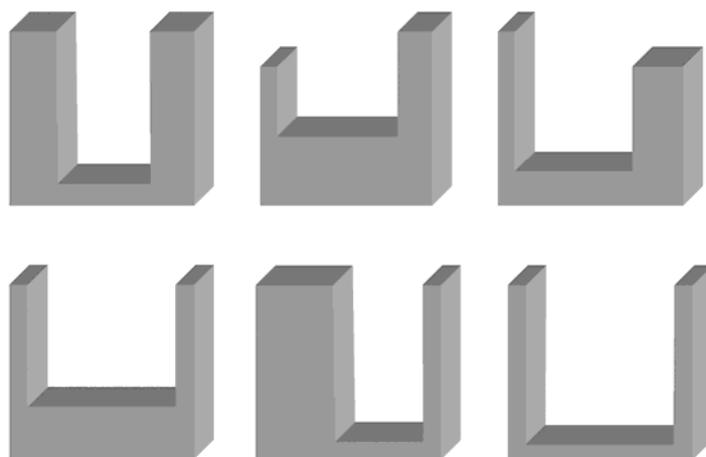


Рис. 1. Различные виды П-образных кронштейнов

Все выше названные способы имеют свои ярко выраженные недостатки. Сортовой прокаткой в калибрах можно получать П-образный профиль, даже с различной толщиной стенки. Тем не менее такой способ имеет ряд недостатков:

- данный способ рассчитан на крупносерийное или массовое производство длинномерных изделий, а значит требуются дополнительные операции для изготовления непосредственно скоб.
- из-за неравномерности деформации в калибрах весьма сложно получить профиль с различными толщинами.
- данный процесс является весьма энергоемким в производстве.

Недостатком профилирования в профилегибочном стане является то, что он также как и сортовая прокатка рассчитан на производство длинномерных изделий. Главным недостатком данного способа является то, что им невозможно получить изделия с различной толщиной стенок, а также изделия толщиной более 8...10 мм (максимальная толщина прокатных листов обычного назначения).

Использования способов листовой штамповки (вырубki-пробивки и гибки) ограничено возможной толщиной листового материала (максимально 8...10 мм), а также данными способами невозможно получить изделия с различными толщинами полок скоб. Также способом гибки невозможно получить изделия с прямыми углами в торцах заготовки, что снижает прочность изделия на разгиб полок скобы.

Значительные трудности при проектировании и отладке технологических процессов, в которых применяются операции гибки, заключаются в необходимости обеспечения высокой точности угловых размеров отштампованных деталей [1]. Связано это с тем, что при снятии внешних деформирующих усилий упругие деформации при разгрузке вызывают большие угловые деформации. При разгрузке слои заготовки, находящиеся в зоне тангенциального растяжения, укорачиваются, а слои, находящиеся в процессе деформирования в зоне сжатия, удлиняются.

Разные знаки деформаций по толщине заготовки приводят при разгрузке к тому, что сечения, перпендикулярные к срединной поверхности заготовки, поворачиваются; это обуславливает изменение угловых размеров и кривизны срединной поверхности и заготовки.

Считая справедливой гипотезу плоских сечений при нагружении и при разгрузке, можно прийти к заключению, что в заготовке при разгрузке после изгиба должны возникнуть остаточные напряжения первого рода. Действительно, каждый слой заготовки (если бы он был связан с соседними) при разгрузке от напряжения, соответствующего пределу текучести, должен получить деформацию укорочения, абсолютная величина которой определяется по закону Гука выражением

$$\Delta l = \pm \frac{\sigma_s}{E} l + \pm \frac{\sigma_s}{E} \rho \alpha \quad (1)$$

здесь знак минус соответствует зоне тангенциального растяжения, а знак плюс — зоне сжатия.

Таким образом получаем выражение для определения угла пружинения:

$$\Delta \alpha = 3 \frac{\sigma_s}{E} \left(\frac{r}{S} + 1 \right) \alpha \quad (2)$$

Анализ был проведен без учета влияния упрочнения; в то же время упрочнение должно оказывать заметное влияние на величину угла пружинения. Для определения характера влияния упрочнения на величину угла пружинения и приближенной оценки степени этого влияния примем, что напряжение текучести находится в линейной зависимости от величины тангенциальной деформации. Тогда максимальное напряжение, действующее в растянутом слое, будет равно

$$\sigma_{\theta_{\max}} = \sigma_{T0} + \Pi \frac{S}{2r + S} \quad (3)$$

где σ_{T0} - экстраполированный предел текучести, соответствующий началу пластических деформаций;

Π — модуль упрочнения.

Таким образом угол пружинения будет равен:

$$\Delta \alpha = \frac{3}{2} \frac{\sigma_{T0} + \Pi \frac{S}{2r + S}}{E} \left(\frac{r}{S} + 1 \right) \alpha \quad (4)$$

Из рассмотрения формул видно, что на величину угла пружинения существенное влияние оказывает отношение предела текучести к модулю упругости (упрочнение повышает предел текучести). Следовательно, наклепанный металл пружинит больше, чем отожженный. Высокопрочные цветные металлы, имеющие предел текучести, близкий к пределу текучести стали, но значительно меньший модуль упругости, пружинят больше, чем сталь.

Значительное влияние на величину угла пружинения оказывает также относительный радиус изгиба $\frac{r}{S}$ и угол α , причем увеличение обеих этих величин (приводящее к увеличению длины зоны пластических деформаций) способствует росту угла пружинения. Можно также заметить, что более интенсивно упрочняющиеся материалы имеют большее пружинение.

Производство П-образных изделий прессованием имеет также ряд недостатков:

- прессование достаточно энергоемкий процесс производства;
- процесс прессования рассчитан на производство длинномерных профилей, и следовательно потребуются дополнительные операции для производства П-образных изделий;
- производство профилей с различными толщинами требует применения специализированного инструмента и приспособлений, что приводит к удорожанию процесса производства.

Поэтому для профилей с разнотолщинными элементами, как и для асимметричных профилей, очко в матрице располагают таким образом, чтобы максимально приблизить тонкие полки к центру матрицы. Такое расположение очка наряду с другими методами выравнивания скоростей истечения металла, о которых будет сказано ниже, позволяет значительно улучшить условия прессования, обеспечить минимальное утягивание периферийных участков тонких полок и уменьшить искажения поперечной и продольной геометрии профиля.

При проектировании профильных матриц наряду с рациональным расположением очка и определением его исполнительных размеров первостепенное значение имеют выбор оптимальных размеров рабочих поясков и применение эффективных методов выравнивания скоростей истечения элементов профиля, обеспечивающих стабильность его геометрии.

Ширина рабочего пояска представляет важный геометрический параметр прессовой матрицы. В отличие от процесса волочения, в котором рабочий (калибрующий) поясок выполняет только функции повышения точности геометрии наружного контура и уменьшения продольной кривизны протягиваемого профиля, при прессовании основная функция рабочего пояска матрицы заключается в выравнивании скоростей истечения отдельных элементов сечения прессуемого профиля.

При прессовании профилей, имеющих разнотолщинные элементы поперечного сечения, наряду с применением различных рабочих поясков и углов торможения на очке матрицы, используются и другие способы выравнивания скоростей истечения элементов профиля.

Для разнотолщинных симметричных профилей, имеющих большие габаритные размеры поперечного сечения с тонкими периферийными элементами, целесообразно применять кольцевые конические проточки на торце матрицы.

Для несимметричных профилей обычно выполняется наклонная плоскость, обеспечивающая направление течения металла к периферии тонкого элемента. Кроме того, выполнение наклонной плоскости позволяет создать при прессовании благоприятные условия для истечения тонкого элемента за счет уменьшения ширины рабочего пояска матрицы и облегчения питания периферийных зон полки.

Для разнотолщинных профилей с небольшими габаритными размерами поперечного сечения часто делают местное заглубление на торце матрицы по тонкому элементу очка. Небольшое заглубление обычно выполняют бормашиной, более глубокие — на электроимпульсной установке с последующей зачисткой шлифовальным кругом.

Необходимо отметить, что в ряде случаев при проектировании матриц для прессования профилей сложной конфигурации расчет размеров рабочих поясков очка и углов торможения представляет весьма сложную задачу. Поэтому окончательная отработка геометрии матрицы производится при опытном прессовании, после чего вносятся необходимые корректировки в рабочие чертежи.

Но, несмотря на указанные недостатки, прессования имеет также ряд преимуществ по сравнению с другими вышеназванными способами:

- возможность успешной пластической обработки с высокими вытяжками, в том числе малопластичных по природе металлов и сплавов;
- возможность получения изделия практически любого поперечного сечения, что при обработке металла другими способами не всегда удается;
- более низкие капитальные затраты, чем при прокатке;

- пластичность металла при прессовании выше, так как металл в контейнере находится в условиях всестороннего сжатия; а это играет большую роль при производстве изделий из труднодеформируемых сплавов и при необходимости получения большой вытяжки (до 50...100, а для алюминия до 1000), в то время как при прокатке за один проход вытяжка обычно меньше 2;

- перенастройка пресса на изделие нового профиля гораздо легче, быстрее и дешевле, чем прокатного стана;

- возможность получения изделий широкого сортамента на одном и том же прессовом оборудовании с заменой только матрицы;

- производство изделий с высоким качеством поверхности и высокой точностью размеров поперечного сечения, что во многих случаях превышает принятую точность при пластической обработке металла другими способами (например, при прокатке).

Так как из всех выше названных способов производства П-образных кронштейнов наиболее рациональными являются холодное выдавливание и прессование то произведем сопоставительный анализ энергосиловых показателей данных процессов применительно к детали-представителю.

В качестве детали-представителя нами выбран кронштейн, представленный на рис. 2.

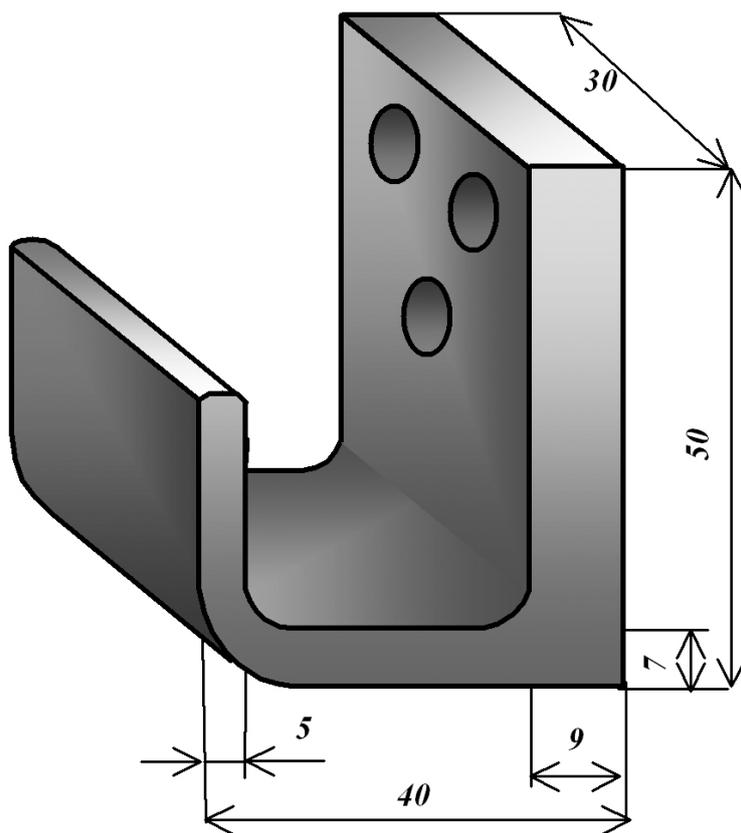


Рис. 2. Деталь-представитель: П-образный кронштейн

Для определения силы прессования в начале приравняем площадь кронштейна к площади круга согласно рекомендациям [2]. Исходя из чего определим ряд важных технологических параметров, таких как размеры контейнера, угол матрицы, коэффициент трения и т.д.

Принимаем: размеры контейнера 180×360 мм; размеры прутка 30×10000 мм, коэффициент трения $\mu=0,5$; угол матрицы $\gamma=90^\circ$.

Для определения силы прессования воспользуемся известной методикой [3].

При прямом выдавливании заготовка помещается в полость контейнера и при рабочем ходе сплошного пуансона выдавливается через отверстие матрицы, расположенной внизу контейнера. В этом случае кроме силы, необходимой для осуществления процесса пластической деформации, требуется дополнительно преодолевать силу трения между контейнером и перемещаемой вниз жёсткой частью заготовки в зоне $H-h$. Следует также отметить, что прямое выдавливание позволяет получать значительно большее разнообразие геометрической формы изделий, чем обратное. Это связано с тем, что переходной части отверстия матрицы при прямом выдавливании можно придать любую требуемую форму.

На схеме представленной на рис.3 используется цилиндрическая система координат, а очаг пластической деформации представлен в виде двух областей: центральной области 1 и периферийной области 2. Определение напряжённого состояния заготовки подробно изложено в разделе 8.1 монографии [3], для более общего случая выдавливания полого стержня. Здесь же приведём частные результаты, вытекающие из общей теории применительно к сплошному стержню.

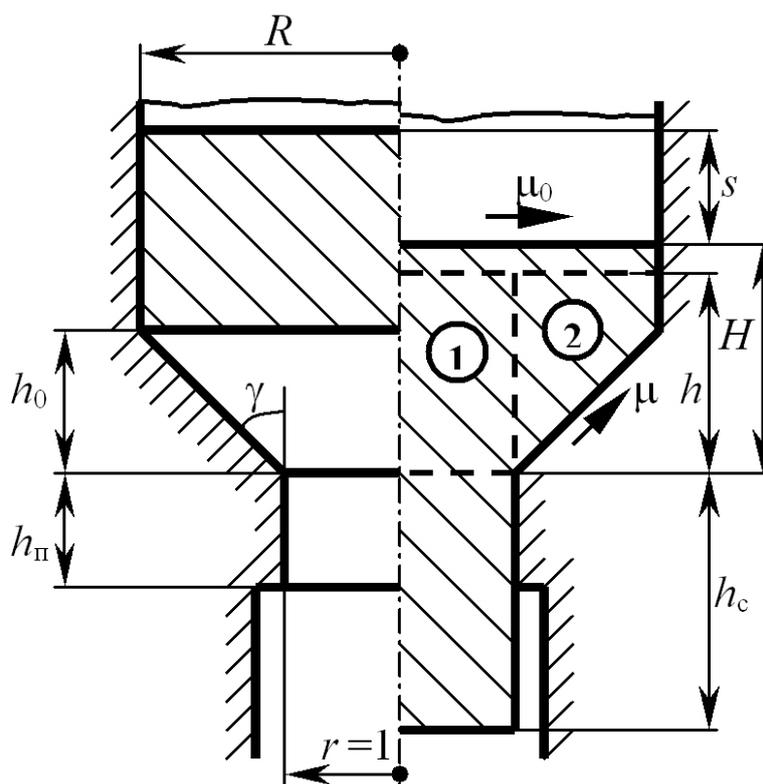


Рис.3. Расчетная схема процесса выдавливания

Высота очага пластической деформации определяется выражением:

$$h = \sqrt{\frac{\left(0,5 + \mu \frac{\sin \gamma - \cos \gamma}{\sin \gamma + \cos \gamma}\right) \left[R^4 (\ln R - 0,75) + R^2 - 0,25\right]}{(R^2 - 1) \left\{0,5(R^2 + 1) \left[1 - 0,5 \left(1 - \frac{1}{R}\right) \cos \gamma\right] - 0,5 + \mu \frac{\sin \gamma - \cos \gamma}{\sin \gamma + \cos \gamma}\right\}}}. \quad (5)$$

При использовании формулы (5) следует учитывать, что физически высота h не может быть меньше высоты h_0 , определяемой выражением:

$$h_0 = (R - 1) \operatorname{ctg} \gamma. \quad (6)$$

Если в результате расчёта окажется, что $h < h_0$, то следует принимать $h = h_0$. Для уменьшения расчётов целесообразно руководствоваться табл. 7.1.[3].

Относительная удельная сила прямого выдавливания вычисляется по формуле:

$$q = \frac{1,1}{R^2} \left\{ 1,5(R^2 - 1) + R^2 \ln R + \left\{ 0,5(R^2 + 1) \left[1 - 0,5 \left(1 - \frac{1}{R} \right) \cos \gamma \right] - 0,5 + \mu \frac{\sin \gamma - \cos \gamma}{\sin \gamma + \cos \gamma} \right\} h + \frac{\left(0,5 + \mu \frac{\sin \gamma - \cos \gamma}{\sin \gamma + \cos \gamma} \right) \left[R^4 (\ln R - 0,75) + R^2 - 0,25 \right]}{(R^2 - 1)h} \right\} +, \quad (7)$$

$$+ 2\mu h_{\Pi}$$

где R – относительный радиус контейнера;

h – высота очага пластической деформации;

μ – коэффициент трения;

γ – угол матрицы;

h_{Π} – высота калибрующего пояса матрицы.

При значительном трении и большой разнице $H-h$ к выражению (7) следует прибавлять удельную силу трения заготовки о стенку контейнера:

$$q_{\text{тр}} = 2\mu \frac{\sigma_{s0}}{\sigma_s} \cdot \frac{H-h}{R}. \quad (8)$$

При отсутствии упрочнения $\sigma_{s0}/\sigma_s = 1$, а при наличии упрочнения можно принимать $\sigma_{s0}/\sigma_s = 0,5$.

С учетом аппроксимации кривой упрочнения алюминиевого сплава АВ [3, с. 80]

$$\sigma_s = 349 - 163e^{-e_i} - 46e^{-20e_i} \text{ МПа}. \quad (9)$$

определяем относительную удельную силу, которая с учетом силы трения по контейнеру будет равна $q = 6,2$; затем находим натуральное значение удельной силы $q_y = 2132$ МПа и силу выдавливания равную $P = 53,3$ МН.

С учётом известных данных [3, с. 213], а также того, что при плоском выдавливании удельные силы в эквивалентных условиях меньше, чем при осесимметричном, можно принять, что $q = 3\sigma_s = 876$ МПа. Тогда сила, необходимая для осуществления холодного выдавливания, $P = qab = 683$ кН.

Проведённое сравнение позволяет сделать вывод, что наиболее рациональным способом получения скобообразных изделий типа П-образных кронштейнов, особенно в случае с различным соотношением толщин образующих элементов, является холодное обратное выдавливание.

Распространение холодного выдавливания связано с тем, что, благодаря упрочнению при пластической деформации, отсутствию надрезов волокна (образующихся при обработке резанием) и направленности его вдоль конфигурации повышаются показатели сопротивления детали обычным нагрузкам. Упрочнение, рациональное направление волокна и значительные степени деформации позволяют повысить такие ответственные эксплуатационные характеристики, как сопротивление усталости, ударную вязкость и вибропрочность. Повышение надежности и долговечности стали в эксплуатации происходит также благодаря улучшению микрогеометрии поверхности. При штамповке выдавливанием коэффициент использования металла по сравнению с литьём или горячей штамповкой повышается на 10-30%, а по сравнению с обработкой резанием — в 2...3 раза. Следовательно, основные усилия конструкторов и технологов должны быть направлены на применение холодного выдавливания взамен обработки резанием. Эффективность такой замены повышается с внедрением процессов штамповки сложных по форме деталей. Наибольшая эффективность достигается при производстве осесимметричных деталей с большими перепадами сечений, сложной внешней конфигурацией и наличием полостей. Обработка резанием таких деталей является трудоемкой, связана с применением сложного и дорогостоящего инструмента и его большим расходом, а главное с большим отходом металла в стружку. Экономия за счет сокращения расхода металла особенно проявляется при замене обработки резанием холодным выдавливанием при производстве деталей из цветных и других металлов и сплавов с высокой стоимостью. При крупносерийном и массовом производстве: значительная экономия достигается за счет снижения трудоемкости. Применение для холодного выдавливания многопозиционных прессов-автоматов позволяет увеличить производительность по сравнению с автоматами для обработки резанием в 10...15 раз и более.

Таким образом, основными достоинствами способа являются универсальность используемого оборудования, меньшая энергоемкость, возможность получения изделия с различной толщиной стенок, прямыми углами. Кроме того, данный способ, в отличие от других вышеописанных, является окончательным, т.е. не требующим дальнейшей обработки изделия, что является весьма важным в современном высокопроизводительном производстве.

Литература

1. *Попов Е. А.* Основы теории листовой штамповки – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
2. *Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х.* Теория прессования металлов. - М.: Металлургия, 1975. - 448 с.
3. *Воронцов А. Л.* Теория штамповки выдавливанием. - М.: Машиностроение. 2004. - 721 с.

УДК 621.974.063

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ БАБЫ МОЛОТА

Тамара Васильевна Милевская

Аспирант 1 года,

кафедра «Технологии обработки давлением»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Е.И. Семёнов,

доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии обработки давлением»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Инструменты, основанные на ударном взаимодействии, являются, пожалуй, одним из самых древних в истории человечества. Известно, что простейшие молотки использовались еще 2.600.000 лет до н.э. Конструкции их были элементарны: камень, привязанный к палке полосками кожи или сухожилиями животных – но уже тогда люди понимали, насколько это эффективно. Удар всегда был одним из самых мощных способов воздействия на различные объекты. С его помощью можно с легкостью разделять предметы на части или придавать им требуемую форму.

С развитием человечества совершенствовались и сами ударные инструменты. Постепенно их стали делать из металла. Появились различные разновидности инструмента. Они отличались по форме и назначению, но основывались на ударном взаимодействии: кузнечные молоты, столярные, молоты каменщиков, всевозможные кувалды, дубины и прочие. Молоты использовались всюду: в быту, в мастерских, на войне. Люди настолько ценили и возвышали силу удара, что молоты стали артефактами богов во многих мифах и легендах. В эпоху индустриализации общества с развитием техники и энергетики люди начали применять удар в промышленности.

Первыми простейшими молотами были молоты с фрикционной доской, подъем падающих частей которых осуществлялся за счет силы трения. В период развития паровых машин появились и паровые молоты. На протяжении всего 20 века происходило развитие молотов и усовершенствование их конструкции. Они позволяют изготавливать массивные и крупногабаритные поковки и штамповки. Также следует отметить среди достоинств молотов, что при недостаточной эффективной энергии деформирование можно осуществить за счет увеличения количества ударов. Главным же недостатком является низкий коэффициент полезного действия (КПД) удара, повышение которого приведет к значительному энергосбережению, что сегодня является очень актуальной задачей.

В физике различают несколько видов удара двух тел в зависимости от принятых допущений. Простейший случай ударного взаимодействия – упругий удар. Процесс удара двух упругих тел разделяют на две фазы. В течение первой – нагрузочной – происходит монотонное нарастание ударных сил, так как кинетическая энергия переходит в энергию упругого деформирования сталкивающихся тел в точках их контакта. После максимального сближения, соответствующего максимуму ударной силы, начинается вторая фаза процесса – разгрузочная – с монотонным спадом ударных сил вплоть до прекращения контакта тел. Размеры и форма их восстанавливаются. В идеальной системе при разгрузке энергия деформированного состояния полностью восстанавливает свой первоначальный уровень, в реальной – только частично.

Динамика системы, состоящей из двух сталкивающихся масс молота в условиях так называемого жесткого удара, лишь с определенной степенью приближения может быть охарактеризована законами сохранения количества движения и кинетической

энергии. В нормальных условиях эксплуатации между сталкивающимися массами закладывают металл, и развивающиеся ударные силы вызывают в нем пластическое течение. Это уже не соударение твердых упругих тел, а упругопластический удар со своими закономерностями. Однако можно полагать, что система замкнута, так как силы, действующие на металл, уравновешены реакцией связи основания (шабота), встречных подвижных частей или рамы. Следовательно, количество движения осталось без изменения, произошло только его перераспределение между столкнувшимися массами. Однако после удара общий уровень кинетической энергии в системе уменьшается вследствие необратимых потерь, обусловленных пластической деформацией (не учитывая рассеяния энергии на колебания и т. п.). Поэтому для реального удара вводят эмпирический коэффициент восстановления (отскока), устанавливающий соотношение между проекциями скоростей на линию центров до и после удара:

$$k_{om} = \frac{v_{m'k} - v_k}{v_0 - v_m'}$$

где k_{om} - коэффициент восстановления (отскока); v_0 - начальная скорость бабы; v_m' - начальная скорость шабота; v_k - конечная скорость бабы; $v_{m'k}$ - конечная скорость шабота.

Для идеально упругого удара разгрузочный импульс равен нагрузочному и $k_{от} = 1$. Для шаботного молота начальная скорость шабота $v_m' = 0$, поскольку последний опирается на подшаботную прокладку, фундамент и грунт. Подшаботная прокладка, обладая определенной жесткостью, вызывает отпор. Опыт показывает, что влияние отпорного импульса отпора невелико, поэтому при анализе энергетике им можно пренебречь и считать шабот свободным.

Исходя из закона сохранения количества движения и выражений для кинетических энергий к началу удара и после его окончания, устанавливаем работу пластического деформирования:

$$A_{деф} = L_{э} - L_{э,к} = \frac{m}{m + m'} (1 - k_{om}^2) L_{э}$$

где $A_{деф}$ - работа пластического деформирования; $L_{э}$ - кинетическая энергия к началу удара; $L_{э,к}$ - кинетическая энергия после окончания удара; m и m' - массы падающей части и шабота соответственно.

Следовательно, энергетический КПД удара, т. е. отношение полезно используемой энергии к ее начальной величине,

$$\eta_y = (1 - k_{om}^2) k_m' = (1 - k_{om}^2) \frac{\xi_m'}{1 + \xi_m'}$$

где $\xi_m' = m' / m$ - коэффициент масс шабота m' и падающих частей m .

Наиболее оптимальным является значение $\xi_m' = 10 \dots 20$. Оно позволяет не утяжелять машину и не снижать КПД.

Если бы обрабатываемый материал обладал идеальной пластичностью, а элементы конструкции молота были абсолютно твердыми, то разгрузочный импульс отсутствовал, и вторая фаза удара характеризовалась бы условием $k_{om} = 0$.

В действительности $k_{om} > 0$, и тем больше, чем выше деформирующая сила. В интервале температур ковки-штамповки для схем деформации с невысокими значениями напряжений (операции ковки, заготовительные переходы объемной штамповки) $k_{om} = 0,15...0,4$.

Таким образом, одним из способов повысить КПД удара является уменьшение отскока падающей массы. В простейшем варианте такая проблема была решена для обычного бытового молотка. Еще в 70-е годы 20го столетия в США было заявлено большое количество патентов на конструкцию ударной части молотка. Все эти конструкции объединяло одно – головка имела полость, которая заполнялась песком или свинцовой дробью. Такая конструкция получила широкое распространение и большое количество коммерческих предложений. Она уменьшала отскок молотка при ударе, чем повышала его эффективность. Безынерционный молоток и сейчас пользуется успехом у потребителей. Стоит отметить, что такой инструмент использовался в СССР на космических станциях, потому что эта конструкция делала возможным использование молотка в условиях невесомости.

На мой взгляд, есть все основания полагать, что использование того же принципа проектирования устройства ударной части промышленных молотов позволит повысить их КПД удара.

Основным недостатком известных устройств (простой молот, молот для листовой штамповки, дизель-молот для забивки свай, штамповки деталей, работающих за счет энергии падающих частей) является кратковременное действие удара. При формообразовании детали в конце возникают высокие силы, вследствие чего часть энергии рассеивается и достаточной деформации не получается, что отрицательно сказывается на качестве получаемых изделий.

Ликвидировать указанный недостаток можно повышением КПД удара за счет увеличения времени действия удара при взаимодействии бабы молота с обрабатываемым изделием, ведущего к увеличению степени деформации материала. Примером реализации этой идеи является патент на изобретение № 2438825, зарегистрированный 10 января 2012 года.

Сущность предлагаемого изобретения заключается в том, что баба молота содержит полость с размещенным в ней наполнителем. Она выполнена с внутренней кольцевой полостью, в верхней части которой размещены пружины для фиксации наполнителя в виде шариков с силой, равной или большей веса всех шариков наполнителя:

$$P_{пруж} \geq m_{шар} \cdot g,$$

где: $P_{пруж}$ - сила пружины;

$m_{шар}$ - масса шариков;

$g \approx 9,81$ м/с² - ускорение свободного падения, причем, масса шариков составляет 20...50 % от массы бабы, а отношение массы бабы к массе одного шарика лежит в пределах:

$$\frac{m_{б}}{m_{шар}} = 2 \cdot 10^3 \dots 3 \cdot 10^3$$

при этом количество шариков можно регулировать.

Также внутренняя полость бабы молота может быть выполнена в виде нескольких цилиндрических углублений количеством N.

Сущность изобретения поясняется в патенте чертежом (рис. 1), на котором изображена в разрезе баба молота, с наполнителем во внутренней кольцевой полости.

Конструкция бабы молота по предлагаемому изобретению состоит из бабы 1, крышки 2, размещенной в верхней части бабы 1, пружины 3 для фиксации наполнителя 4 в виде шариков, размещенного во внутренней кольцевой полости (с наружным и внутренним диаметрами $D_{нар}$ и $D_{внутр}$ и глубиной H) либо в N цилиндрических углублениях (диаметром $D_{цил.углуб}$ и глубиной H) бабы 1.

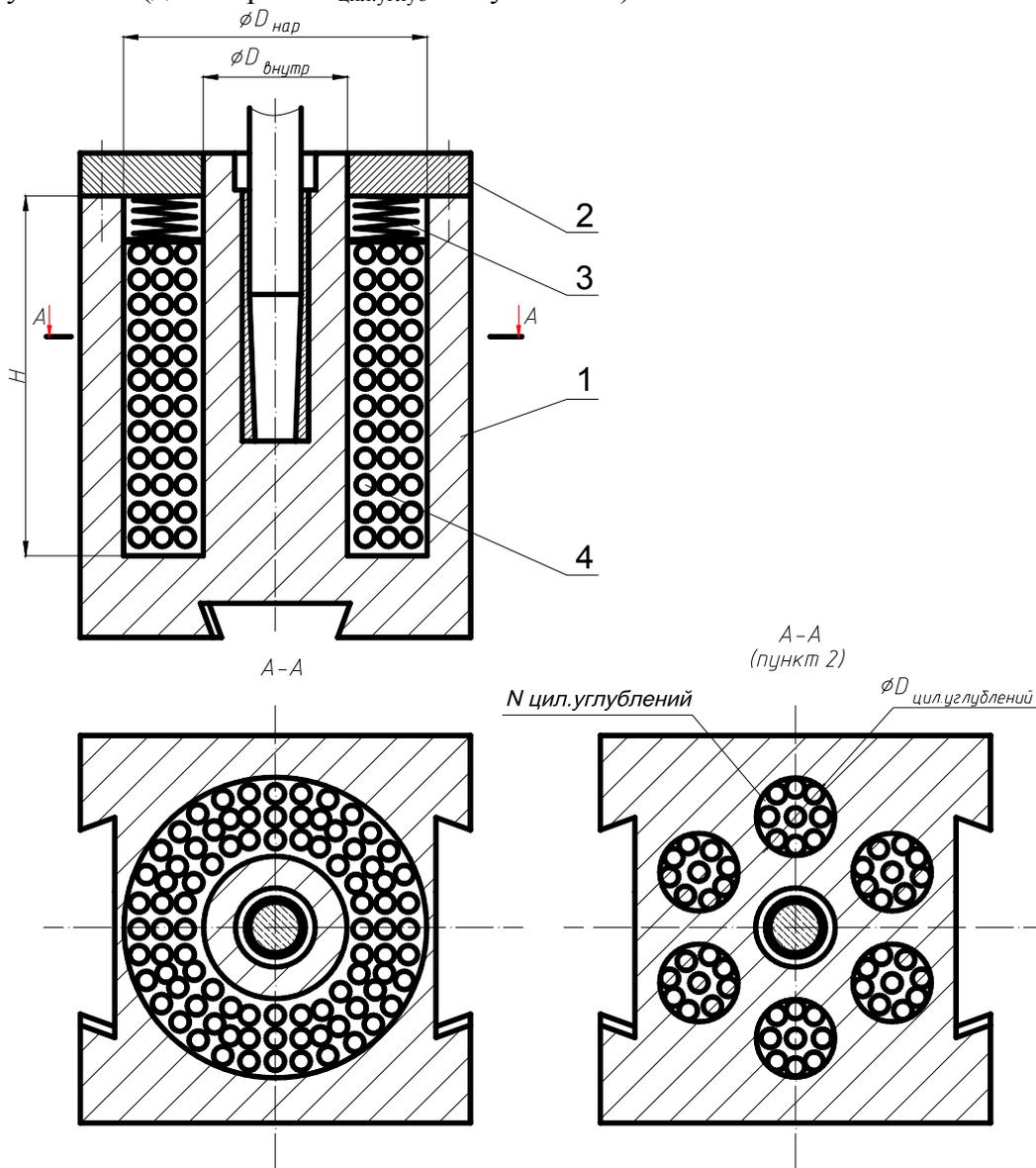


Рис. 1. Чертеж конструкции бабы молота

Планируется изменение конструкции бабы молота с целью повышения КПД удара. Предполагается заменить стандартную бабу на специальную бабу с шариками. В ходе эксперимента будет варьироваться общая масса шариков, их диаметр и способ закрепления. Для обеспечения возможности сравнения результатов экспериментов по осадке обычной и специальной бабой их массы принимаются одинаковыми и равными 22,3 кг. Масса засыпаемых шариков ограничена 40% от общей массы бабы, что связано с максимальными размерами полости в специальной бабе, которые ограничены конструктивными возможностями изготовления бабы по критериям прочности при эксплуатации.

Известно, что работы в этом направлении уже проводились ранее рядом исследователей. В результате работ В.Ю. Лавриненко КПД удара молота повысился примерно на 30 %.

В связи с вышеизложенным задача повышения КПД удара молотов является актуальной задачей. Вместе с тем, в литературе этот вопрос освещен недостаточно. Поэтому необходимы экспериментальные и теоретические исследования процесса удара при осадке на молотах по следующим направлениям:

1. Разработка методики экспериментального исследования удара при осадке.
2. Экспериментальное исследование удара при осадке с различными параметрами удара (T , v и т.д.) и использованием специальных устройств и приспособлений (например, пустотелая баба с наполнением).
3. Построение математической модели процесса удара при осадке и определение оптимальных параметров удара, обеспечивающих повышение КПД.
4. Определение оптимальных параметров специальных устройств, обеспечивающих повышение КПД.
5. Разработка методики компьютерного моделирования удара при осадке.
6. Проверка адекватности математической модели данным физического эксперимента.
7. Разработка на основе проведенных исследований методики проектирования технологического процесса осадки с увеличенным КПД удара.

Планируемая работа будет проводиться на лабораторном копре, расположенном на кафедре «Технологии обработки давлением» Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана с использованием современной цифровой скоростной видеоаппаратуры.

Постановка экспериментов по пластическому деформированию стали в горячем состоянии в лабораторных и производственных условиях связана со значительной трудоемкостью и большими затратами. Поэтому целесообразно процессы горячего деформирования моделировать на свинце с использованием теории подобия. Данный метод моделирования позволяет провести качественное и количественное изучение процесса деформирования на уменьшенных моделях, определять основные закономерности формоизменения, энергосиловые и другие параметры исследуемого процесса, а также разрабатывать на основе полученных данных новые технологические процессы.

Свинец при комнатной температуре (20 °С) деформируется с одновременной рекристаллизацией, как и сталь при ковочных температурах. Кривые упрочнения различных сталей в горячем состоянии и свинца качественно почти не отличаются.

После обработки и анализа полученных результатов и разъяснения физических основ происходящего процесса будет построена математическая модель для компьютерного моделирования. В зависимости от результатов моделирование будет осуществляться в программном комплексе «Динамика-2» (НИИ Механики Нижегородского государственного университета им. Лобачевского) или LS-DYNA.

По завершении всех физических экспериментов, получении результатов моделирования и проведении сравнительной оценки будут даны рекомендации по проектированию технологического процесса осадки на молотах с увеличенным КПД удара

Литература

1. *Атрошенко А.П., Булат Е.П.* Штамповка на молотах, фрикционных и гидравлических прессах. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отд., 1981 – 113с.

2. *Балуев С.А., Экарев М.С.* Совершенствование технологических процессовковки. – М: Машиностроение, 1984. – 67 с.
3. *Живов Л.И., Овчинников А.Г., Складчиков Е.Н.* Кузнечно-штамповочное оборудование: Учебник для вузов / Под ред. Л.И. Живова. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. - 560 с.
4. *Мигачев Б.А.* Деформируемость и качество в процессахковки – Екатеринбург, 1995. – 149 с.
5. *Петров Л. Н., Касатонов В.Ф., Этин И.З.* Ковка на молотах и гидравлических прессах. Л.: Машиностроение. Ленинградское отд., 1980. – 127 с.
6. Патент РФ № 2438825
7. Патент США № 3,088,506
8. <http://en.wikipedia.org/wiki/Hammer>
9. <http://toolmonger.com/2007/01/24/preview-sk-dead-blow-hammers/>

УДК 621.77

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ШТАМПОВКИ БОКОВИНЫ РЕНО ЛОГАН С ПОМОЩЬЮ ПК AUTOFORM

Александр Викторович Поликарпов

*Студент 6 курса,
кафедра «Технологии обработки давлением»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: А.В. Власов,
доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии обработки давлением»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Изготовление кузовных деталей легковых автомобилей является наиболее сложной и обособленной частью технологии листовой штамповки. Теоретические вопросы в области кузовной штамповки решались в основном на основе личного опыта и интуиции отдельных специалистов[1, 2]. В связи с усложнением формы деталей и сокращением сроков на разработку автомобиля требуются новые методы решения подобных задач. Программный комплекс Autoform позволяет достаточно быстро проанализировать штампуемость детали и оптимизировать технологический процесс. В работе при помощи программного комплекса Autoform разработан технологический процесс штамповки боковины Renault Logan.

Для моделирования процесса штамповки в программном комплексе Autoform необходима геометрическая модель детали (рис. 1) в формате IGES, созданная в среде твердотельного моделирования [3]. Одним из важных моментов проектирования является определение угла поворота детали в штампе. Конструктор математической модели разрабатывает ее в осях автомобиля, а при разработке техпроцесса деталь должна быть ориентирована оптимальным для вытяжки образом[6]. Положение рассматриваемой детали в штампе обеспечивает минимальную глубину вытяжки и отсутствие поднутрений (рис. 2).

Форма поверхности прижима задается сплайном, приближенно повторяющим контур детали (рис. 3). Это обеспечивает более равномерную глубину вытяжки.

Элементы детали параллельные поверхности прижима удобно расположить на ней, уменьшая таким образом глубину вытяжки [3].

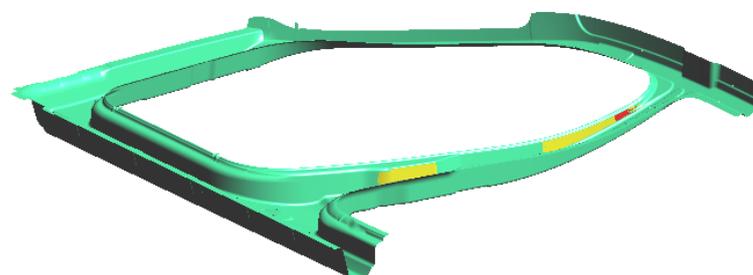


Рис. 1. Исходная геометрическая модель детали с поднутрениями

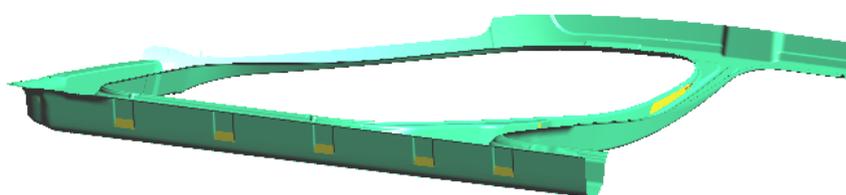


Рис. 2. Поднутрения в детали после поворота



Рис. 3. Форма поверхности прижима

Далее необходимо сконфигурировать технологическую надстройку – поверхность, сопрягающую деталь с прижимом. Для этого задаются радиусы скругления пуансона и матрицы (рис. 4), а также граница проема матрицы (рис. 5). В зоне I (рис. 6) из-за большой кривизны поверхности прижима увеличиваются напряжения от изгиба-спрямления и трения на кромке матрицы, что повышает вероятность разрыва. Для ее снижения радиус скругления в этой зоне увеличен.

После первых результатов моделирования были определены места возможного разрушения и образования складок. В областях возможного разрыва были увеличены радиусы, а рядом с местами образования складок установлены перетяжные пороги, коэффициенты торможения которых были подобраны итерационным путем таким образом, чтобы большая часть детали была в безопасной зоне, не допуская при этом образования разрывов.

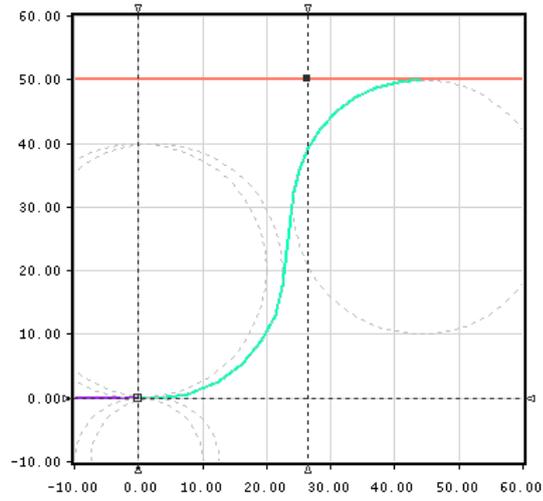


Рис. 4. Профиль технологической надстройки

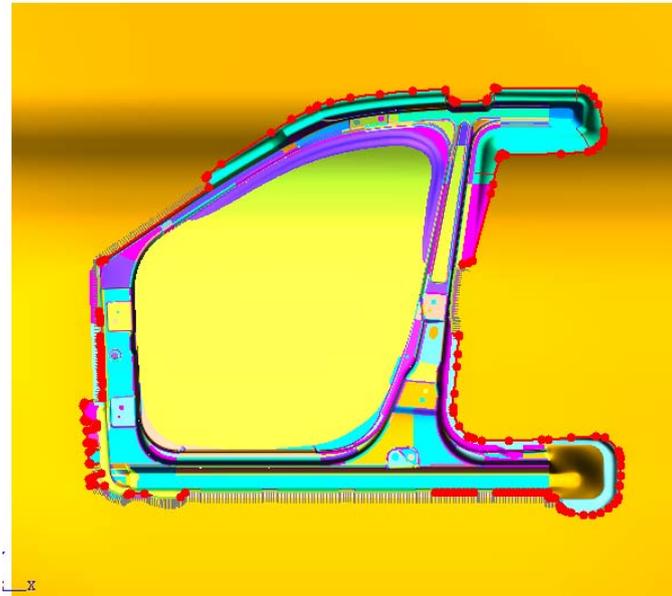


Рис. 5. Граница проема матрицы

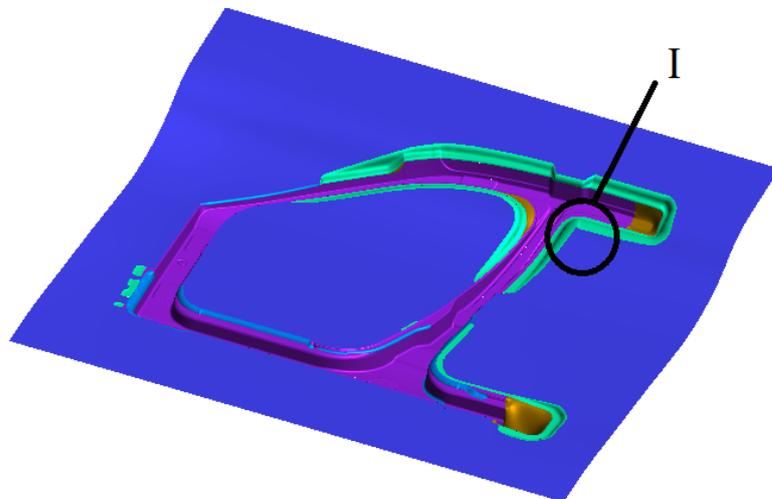


Рис. 6. Технологическая надстройка

В зонах 2 и 3 (рис. 7) образование складок легко устраняется добавлением перетяжных порогов и подбором их коэффициентов торможения. Более проблемной является зона 1, где добавление порогов для устранения складок на фланце (рис. 8) приводит к появлению разрывов в области выштамповки (рис. 9). Радиусы скругления в ней были увеличены, так как получить качественную деталь при исходных значениях радиусов оказалось невозможно. Коэффициенты торможения порогов 1 и 3 подобраны совместно при помощи модуля Autoform-Sigma [4] таким образом, чтобы обеспечить в области выштамповки состояние двухосного растяжения, при котором возможны большие предельные деформации без разрыва [5]. Благодаря этому образование складок в зоне 1 было сведено к минимуму при отсутствии разрывов (рис. 10).

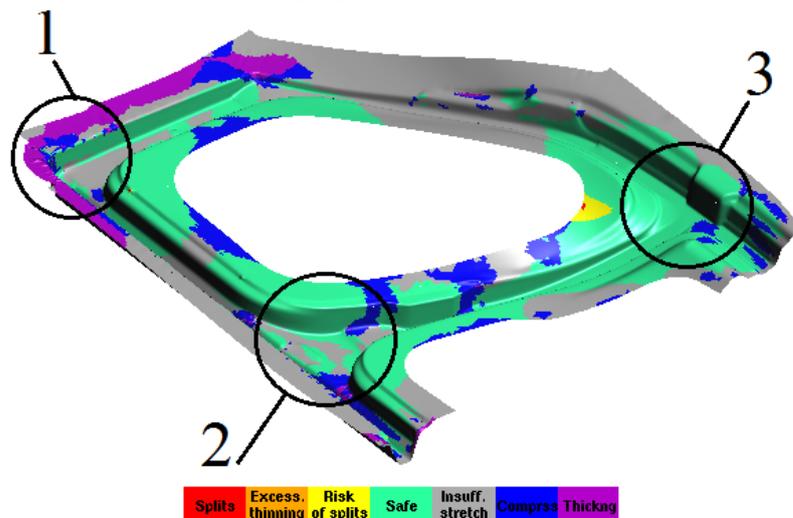


Рис. 7. Проблемные зоны детали

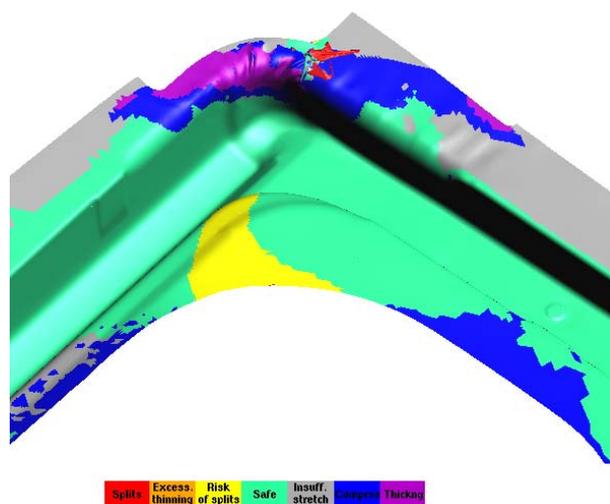


Рис. 8. Складки на фланце

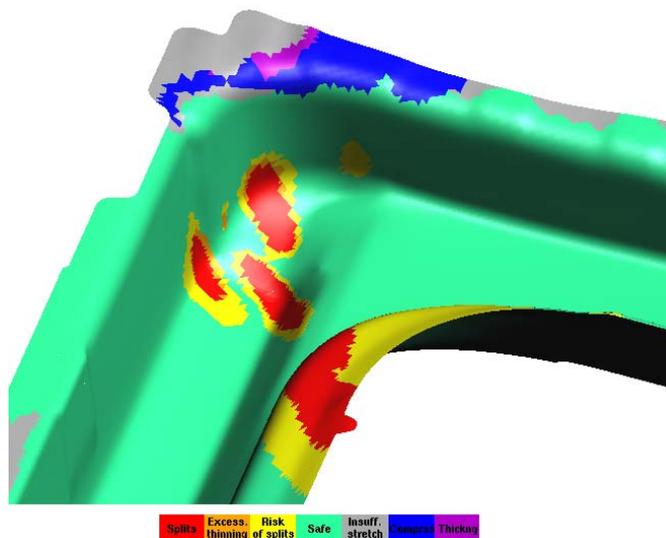


Рис. 9. Разрывы в области выштамповки

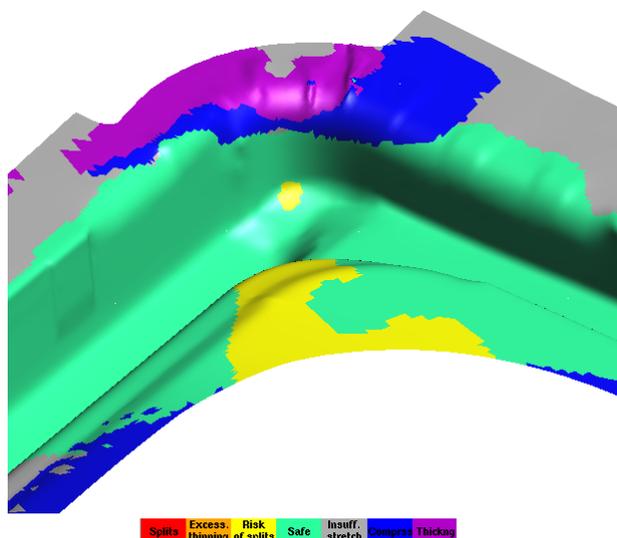


Рис. 10. Зона 1 после подбора порогов

По результатам моделирования предложен техпроцесс вытяжки с прижимом на прессе двойного действия с применением 6 перетяжных порогов (рис. 11), коэффициенты торможения которых представлены в табл. 1. Autoform Drawbead generator позволяет подобрать профиль перетяжного порога по его коэффициенту торможения (рис. 12) [3]. Ширина и радиусы на входе и выходе приняты одинаковыми для всех порогов, а различные коэффициенты торможения получены путем варьирования высотой порогов. Деталь, полученная при данном техпроцессе, представлена на рис. 13.

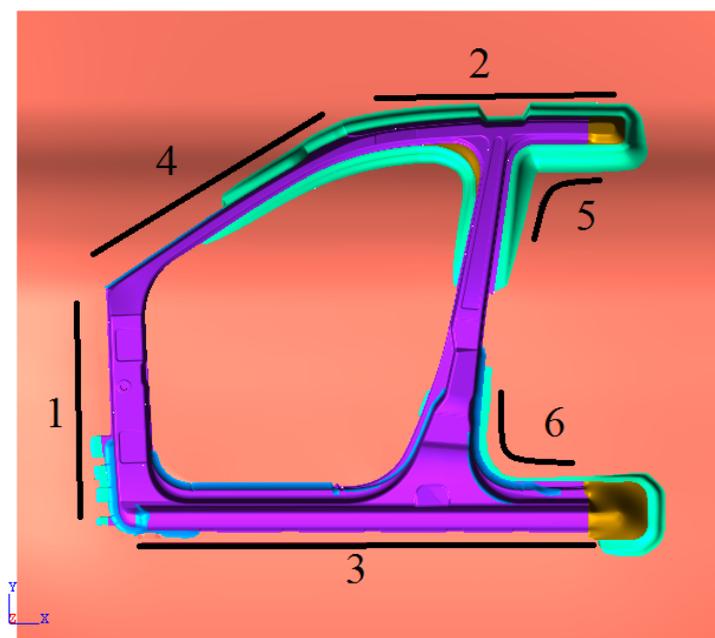


Рис. 11. Перетяжные пороги

Таблица 1. Перетяжные пороги

№ порога	Коэффициент торможения	Высота порога
1	1	4,5
2	0,9	3,83
3	0,77	3,11
4	0,35	1,37
5	0,9	3,83
6	0,9	3,83

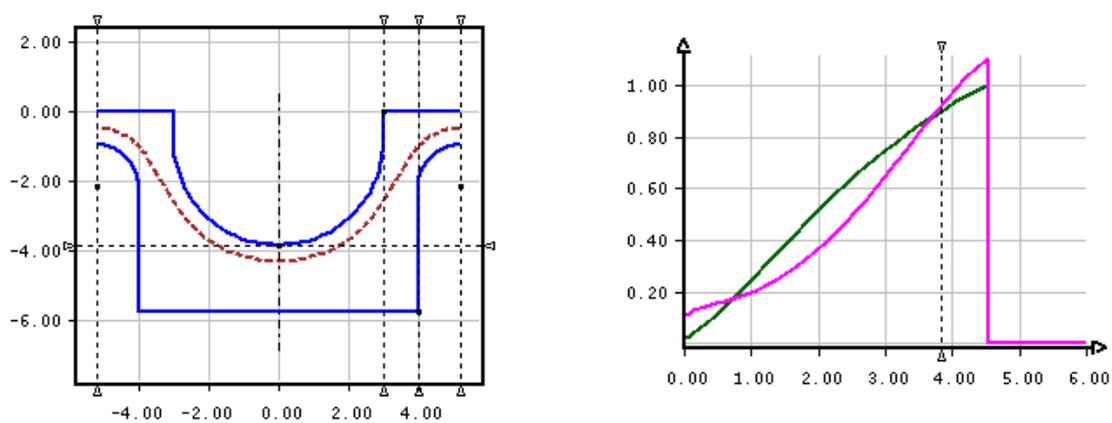


Рис. 12. Подбор профиля перетяжных порогов

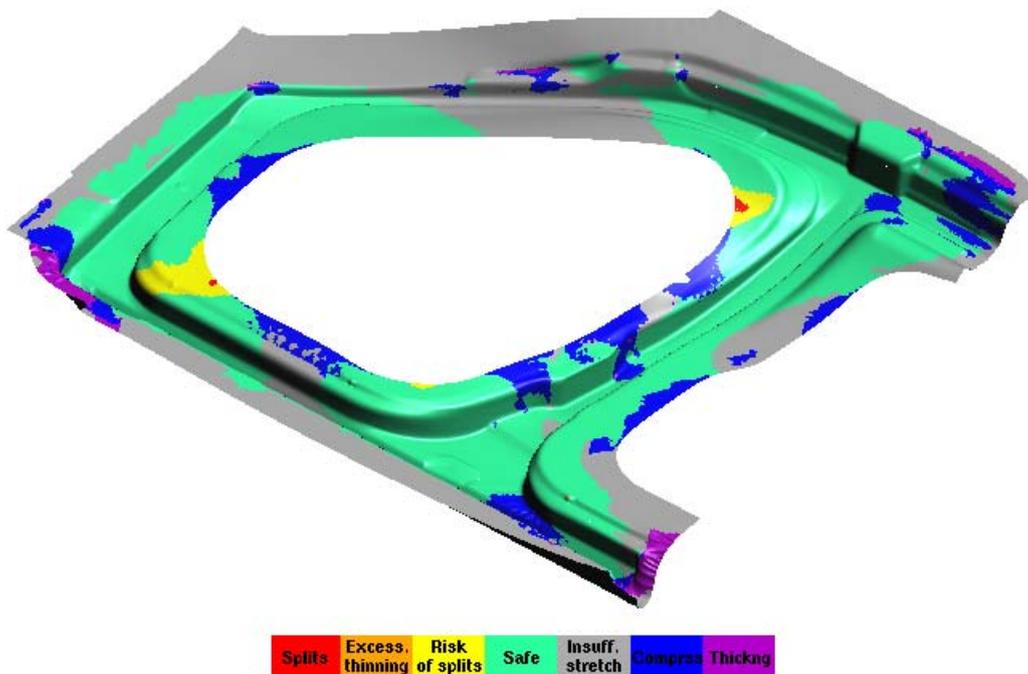


Рис. 13. Деталь после вытяжки

Литература

1. Зуев Р.Н. Шпунькин Н.Ф. Вытяжка облицовочных деталей кузова автомобиля. – М.: МГТУ «МАМИ», 2006. – 152 с.
2. Шпунькин Н.Ф. Технология кузовостроения. – М.: МГТУ «МАМИ», 2007. – 184 с.
3. Autoform 3.1 Workshop Manual. – М.: Autoform Engineering GmbH, 2002. – 564 с.
4. Бузлаев Д.В. Антонец А.Н. Калаев В.В. Ряснянский А.В. Новые методы оценки устойчивости и производительности технологических процессов. – М.: САПР и Графика №4, 2006.
5. Бузлаев Д.В. Компьютерное моделирование листовой штамповки с применением современных материалов. – М.: САПР и Графика №6, 2004.
6. Ярыш А.В. Проектирование штамповой оснастки на ОПП «АвтоВАЗ». – М.: САПР и Графика №2, 2012.

УДК 621.9-18

ПОВЫШЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ЗАСЧЕТ СОВМЕЩЕНИЯ ОПЕРАЦИЙ ОБЖИМА, РАЗДАЧИ И ВЫТЯЖКИ

Евгения Олеговна Яковлева

Студентка 5 курса,

кафедра «Технологии обработки давлением»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: И.Н.Шубин,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии обработки давлением»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Прогресс в машиностроении зависит от совершенствования технологии изготовления машиностроительных деталей, разработки новых способов обработки давлением, повышения их интенсивности и надежности. Одним из эффективных способов изготовления деталей является листовая штамповка, широко применяемая в автомобилестроении и в других отраслях промышленности.

Так как дефекты, возникающие в процессе формоизменения, определяются механической схемой деформаций, то естественный способ их устранения - изменение этой схемы, что возможно при нагружении очага деформации некоторыми дополнительными видами внешних нагрузок, наличие которых не является обязательным для осуществления заданного формоизменения, т.е. использование совмещенных процессов обработки давлением.

Цель работы – получение детали (рис. 1) с принятыми размерами без дефектов путем совмещения операций вытяжки, обжима и раздачи.

В работе проведены расчет и моделирование процесса изготовления детали путем совмещения операций вытяжки, обжима и раздачи, разработана штамповая оснастка для осуществления данного технологического процесса.

Деталь изготавливается из стали 08 кп за два перехода вытяжки и процесса совмещения операций вытяжки, раздачи и обжима.

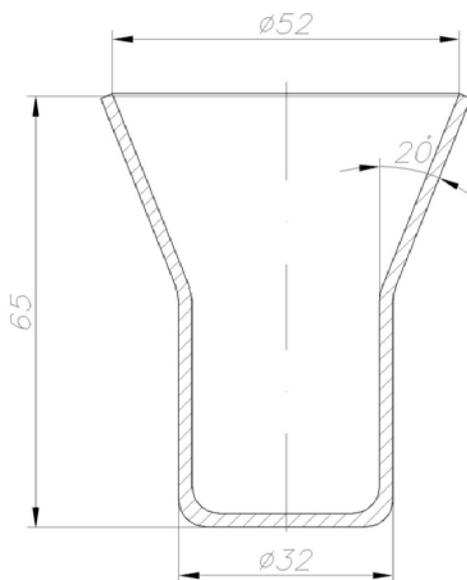


Рис. 1. Деталь

При осуществлении операции раздачи предельный коэффициент формоизменения – 1,2, обжима – 1,4, вытяжки – 2, при совмещении этих операций – 3,5.

Расчет необходимого числа переходов вытяжки.

$$\text{Общий коэффициент вытяжки: } m = \frac{d_{cp}}{D} = \frac{45}{106,5} = 0,42$$

Из таблицы [1]:

$$\frac{S}{D} 100 = \frac{2}{106,5} \cdot 100 = 1,88$$

$m_1 = 0,55 > m$, следовательно производим вытяжку за несколько переходов.

$$m = m_1 \cdot m_2 \cdot m_n$$

$m_2 = m/m_1 = 0,42/0,55 = 0,76$, что соответствует табличному, тогда

$$m_1 = 0,55$$

$$m_2 = 0,76$$

$$m_1 \cdot m_2 = 0,55 \cdot 0,76 = 0,418$$

Найдем диаметры после каждой вытяжки:

$$d_1 = m_1 D = 0,55 \cdot 106,5 = 58,6 \text{ мм}$$

$$d_2 = m_2 d_1 = 0,76 \cdot 58,6 = 45 \text{ мм}$$

Высота детали после каждого перехода:

$$h_1 = 0,25 \left(\frac{D}{m_1} - d_1 \right) + 0,43 \frac{r_{d1}}{d_1} (d_1 + 0,32 r_{d1})$$

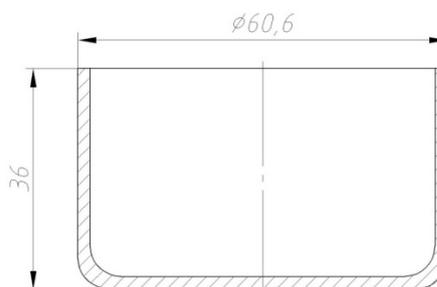
$r_{d1} = r_n + 0,5 \cdot S = 4 + 0,5 \cdot 2 = 5 \text{ мм}$ – радиус донной части

$$h_1 = 0,25 \left(\frac{106,5}{0,55} - 58,6 \right) + 0,43 \frac{5}{58,6} (58,6 + 0,32 \cdot 5) = 36,0 \text{ мм}$$

$$h_2 = 0,25 \left(\frac{D}{m_1 \cdot m_2} - d_2 \right) + 0,43 \frac{r_{d2}}{d_2} (d_2 + 0,32 r_{d1})$$

$$h_2 = 0,25 \left(\frac{106,5}{0,55 \cdot 0,76} - 45 \right) + 0,43 \frac{5}{45} (45 + 0,32 \cdot 5) = 54,7 \text{ мм}$$

Рис. 2. 1-ый переход вытяжки



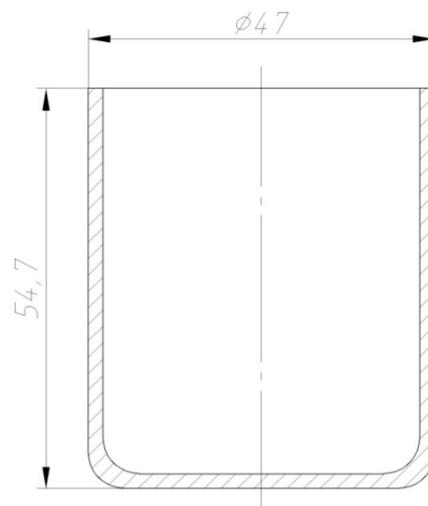


Рис. 3. 2-ой переход вытяжки

Определение напряжений в опасном сечении для 1-го и 2-го переходов вытяжки.

$$\sigma_{p\max} = \sigma_s \left(\ln \frac{R}{r} + \frac{\mu Q}{\pi R S \sigma_s} + \frac{S}{2r_m + S} \right) (1 + 1,6\mu)$$

$$\sigma_{scp1} = \sigma_m \left(1 + 0,5 \ln \frac{1}{m_1} \right) = 285,8 \text{ МПа}$$

Q-сила прижима требуется, т.к. выполняется условие:

$$\frac{S}{D} 100 \leq 4,5(1 - m_1)$$

$$1,88 \leq 2,03$$

Сила прижима будет равна:

$$Q = \frac{\pi}{4} (D^2 - (d + 2r_m)^2) q$$

q-удельная сила прижима, для стали 08кп составляет 2..2,5 МПа

$$Q = \frac{\pi}{4} (106,5^2 - (58,6 + 2 \cdot 10)^2) 2,25 = 9121 \text{ Н}$$

$$\sigma_{p\max} = \sigma_s \left(\ln \frac{R}{r} + \frac{\mu Q}{\pi R S \sigma_s} + \frac{S}{2r_m + S} \right) (1 + 1,6\mu) =$$

$$= 285,8 \left(\ln \frac{53,25}{29,3} + \frac{0,19121}{\pi \cdot 53,25 \cdot 2 \cdot 285,8} + \frac{2}{2 \cdot 10 + 2} \right) (1 + 1,6 \cdot 0,1) = 231,4 \text{ МПа}$$

На втором переходе максимальное напряжение в опасном сечении, если мы берем матрицу с радиусной кромкой = 12 мм, будет равно:

$$\sigma_{p\max} = \sigma_s \left(\ln \frac{R}{r} + \frac{S}{2R_p} + \frac{S}{2r_m + S} \right) (1 + \alpha_1 \mu)$$

$$\sigma_{scp2} = \sigma_{scp1} \left(1 + \frac{1}{2} \ln \frac{1}{m_2} \right)$$

$$\sigma_{ср2} = 285,8 \left(1 + \frac{1}{2} \ln \frac{1}{0,76} \right) = 325,0 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\rho_{max}} = 325,0 \left(\ln \frac{29,3}{22,5} + \frac{2}{2 \cdot 10,8} + \frac{2}{2 \cdot 12 + 2} \right) (1 + 0,79 \cdot 0,1) = 152,1 \text{ МПа}$$

Радиус изгиба участка свободного изгиба будет равен: $R_{\rho} = \frac{\sqrt{RS}}{\sin \alpha_1}$

$$\begin{aligned} \sin \frac{\alpha_1}{2} &= \frac{\sqrt{RS + 4(2r_m + S)(R - r)} - \sqrt{RS}}{4r_m + 2S} = \\ &= \frac{\sqrt{29,3 \cdot 2 + 4(2 \cdot 12 + 2)(29,3 - 22,5)} - \sqrt{29,3 \cdot 2}}{4 \cdot 12 + 2 \cdot 2} = 0,385 \end{aligned}$$

$$\frac{\alpha_1}{2} = 22,6^{\circ} \rightarrow \alpha_1 = 45,3^{\circ} = 0,79 \text{ рад}$$

$$R_{\rho} = \frac{\sqrt{29,3 \cdot 2}}{\sin 45,3^{\circ}} = 10,8 \text{ мм}$$

Определение сил и работы деформирования для 1-го и 2-го переходов вытяжки.

Сила деформирования на первом переходе:

$$P = \pi d S \sigma_{\rho_{max}} = \pi \cdot 58 \cdot 6 \cdot 2 \cdot 231,4 = 85200 \text{ Н}$$

Сила деформирования на втором переходе:

$$P = \pi d S \sigma_{\rho_{max}} = \pi \cdot 45 \cdot 2 \cdot 152,1 = 43005 \text{ Н}$$

Работа деформирования при первом переходе:

$$A1 = \lambda \frac{Ph}{1000} = \frac{0,65 \cdot 85200 \cdot 36}{1000} = 1993,7 \text{ Дж}$$

При втором переходе:

$$A2 = \lambda \frac{Ph}{1000} = \frac{0,65 \cdot 43005 \cdot 54,7}{1000} = 1529,0 \text{ Дж}$$

Совмещение операций вытяжки, раздачи и обжима.

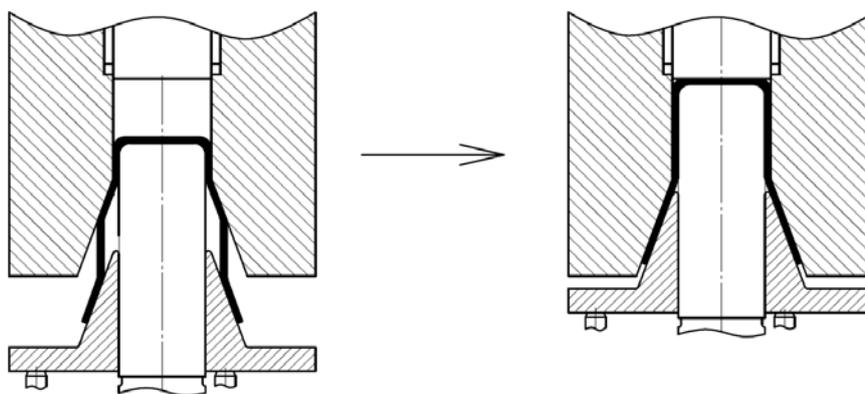


Рис.4. Схема совмещения операций

Определение напряжений в опасном сечении:

При вытяжке максимальное напряжение в опасном сечении, если мы берем матрицу с радиусной кромкой равной 12 мм, будет равно:

$$\sigma_{\rho \max} = \sigma_s \left(\ln \frac{R}{r} + \frac{S}{2R_\rho} + \frac{S}{2r_m + S} \right) (1 + \alpha_2 \mu)$$

$$m_3 = \frac{r}{R} = \frac{15}{22,5} = 0,67$$

$$\sigma_{scp3} = \sigma_{scp2} \left(1 + \frac{1}{2} \ln \frac{1}{0,67} \right)$$

$$\sigma_{scp3} = 325,0 \left(1 + \frac{1}{2} \ln \frac{1}{0,67} \right) = 390,9 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\rho \max} = 390,9 \left(\ln \frac{22,5}{15} + \frac{2}{2 \cdot 8,7} + \frac{2}{2 \cdot 12 + 2} \right) (1 + 0,88 \cdot 0,1) = 254,04 \text{ МПа}$$

Радиус изгиба участка свободного изгиба будет равен: $R_\rho = \frac{\sqrt{RS}}{\sin \alpha_2}$

$$\begin{aligned} \sin \frac{\alpha_2}{2} &= \frac{\sqrt{RS + 4(2r_m + S)(R - r)} - \sqrt{RS}}{4r_m + 2S} = \\ &= \frac{\sqrt{22,5 \cdot 2 + 4(2 \cdot 12 + 2)(22,5 - 15)} - \sqrt{22,5 \cdot 2}}{4 \cdot 12 + 2 \cdot 2} = 0,423 \end{aligned}$$

$$\frac{\alpha_2}{2} = 27,8^\circ \rightarrow \alpha_2 = 55,7^\circ = 0,88 \text{ рад}$$

$$R_\rho = \frac{\sqrt{22,5 \cdot 2}}{\sin 55,7^\circ} = 8,7 \text{ мм}$$

Напряжения при обжиге (примем $\mu = 0,1$; $\alpha = 20^\circ$; $\sigma_T = 220 \text{ МПа}$):

$$\sigma_\rho = -\sigma_s (1 + \mu \text{ctg} \alpha) \left(1 - \frac{r_0}{R} \right)$$

$$\sigma_s = \sigma_T \left(1 + \frac{1}{2} \ln k_{об} \right) = 220 \left(1 + \frac{1}{2} \ln 1,4 \right) = 257,01 \text{ МПа}$$

$$\sigma_\rho = -257,01 (1 + 0,1 \text{ctg} 20^\circ) \left(1 - \frac{15}{21} \right) = -96,04 \text{ МПа}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\rho \max} &= -\sigma_s (1 + \mu \text{ctg} \alpha) \left(1 - \frac{r_0}{R} \right) (3 - 2 \cos \alpha) \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{\frac{R}{r_0}} \right) = \\ &= -257,01 (1 + 0,1 \text{ctg} 20^\circ) \left(1 - \frac{15}{21} \right) (3 - 2 \cos 20^\circ) \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{\frac{15}{21}} \right) = -99,27 \text{ МПа} \end{aligned}$$

Напряжения при раздаче (примем $\mu = 0,1$; $\alpha = 20^\circ$; $\sigma_T = 220 \text{ МПа}$):

$$\sigma_\rho = -\sigma_s (1 + \mu \text{ctg} \alpha) \left(\frac{R_{раз}}{R_{заз}} - 1 \right)$$

$$\sigma_s = \sigma_T \left(1 + \frac{1}{2} \ln k_{раз} \right) = 220 \left(1 + \frac{1}{2} \ln 1,2 \right) = 240,05 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\rho} = -240,05(1 + 0,1 \operatorname{ctg} 20^{\circ}) \left(\frac{27}{22,5} - 1 \right) = -62,79 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\rho \max} = -\sigma_s (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) \left(\frac{R_{\text{раз}}}{R_{\text{заг}}} - 1 \right) (3 - 2 \cos \alpha) \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{\frac{R_{\text{заг}}}{R_{\text{раз}}}} \right) =$$

$$= -240,05(1 + 0,1 \operatorname{ctg} 20^{\circ}) \left(\frac{27}{22,5} - 1 \right) (3 - 2 \cos 20^{\circ}) \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{\frac{22,5}{27}} \right) = -65,93 \text{ МПа}$$

$$s_{\min} = s_0 \sqrt{R_{\text{заг}} / R_{\text{раз}}} = 2 \sqrt{22,5 / 27} = 1,83 \text{ мм}$$

Определение силы и работы деформирования:

Силы деформирования на третьем переходе вытяжки:

$$P = \pi d S \sigma_{\rho \max} = \pi \cdot 30 \cdot 2 \cdot 254,04 = 47861 \text{ Н}$$

$$A_3 = \lambda \frac{Ph}{1000} = \frac{0,65 \cdot 47861 \cdot 35}{1000} = 1088,8 \text{ Дж}$$

Работа деформирования при обжиге:

$$A = \lambda \frac{Ph}{1000} = \frac{0,65 \cdot 20312 \cdot 11}{1000} = 145,2 \text{ Дж}$$

Работа деформирования при раздаче:

$$A = \lambda \frac{Ph}{1000} = \frac{0,65 \cdot 18631,8 \cdot 12,5}{1000} = 151,4 \text{ Дж}$$

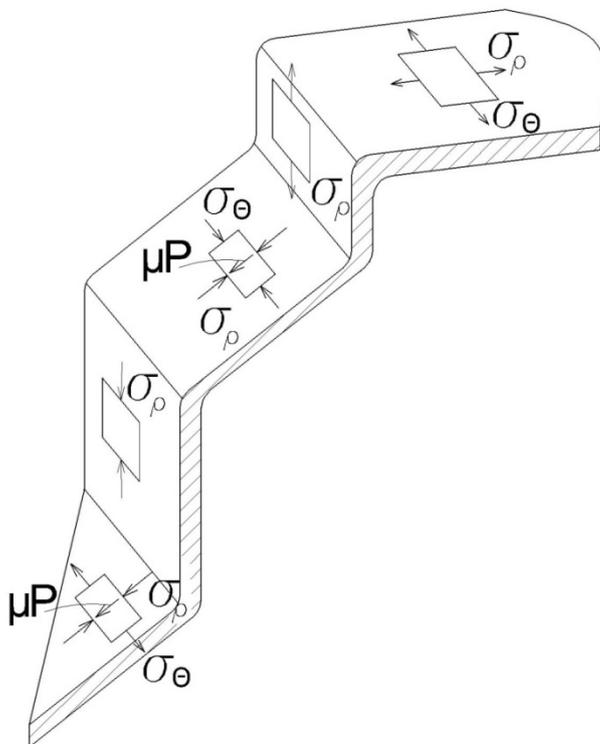


Рис. 5. Определение напряжений

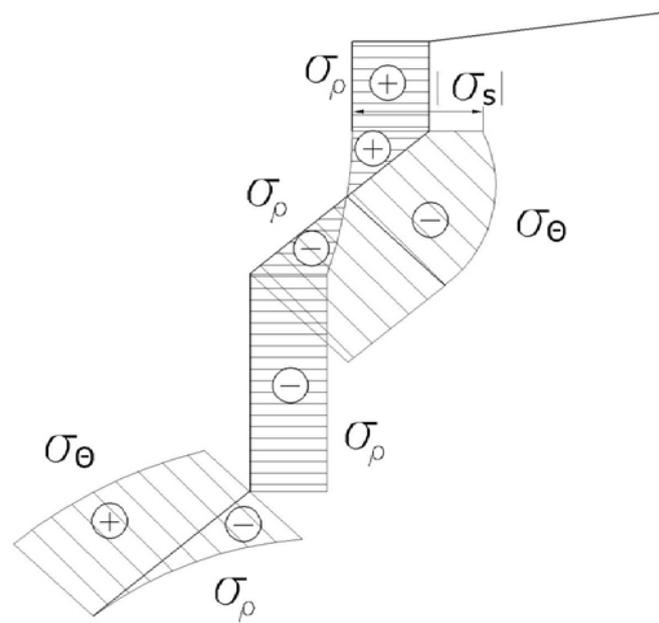


Рис.6. Эпюра напряжений
Штамповая оснастка.

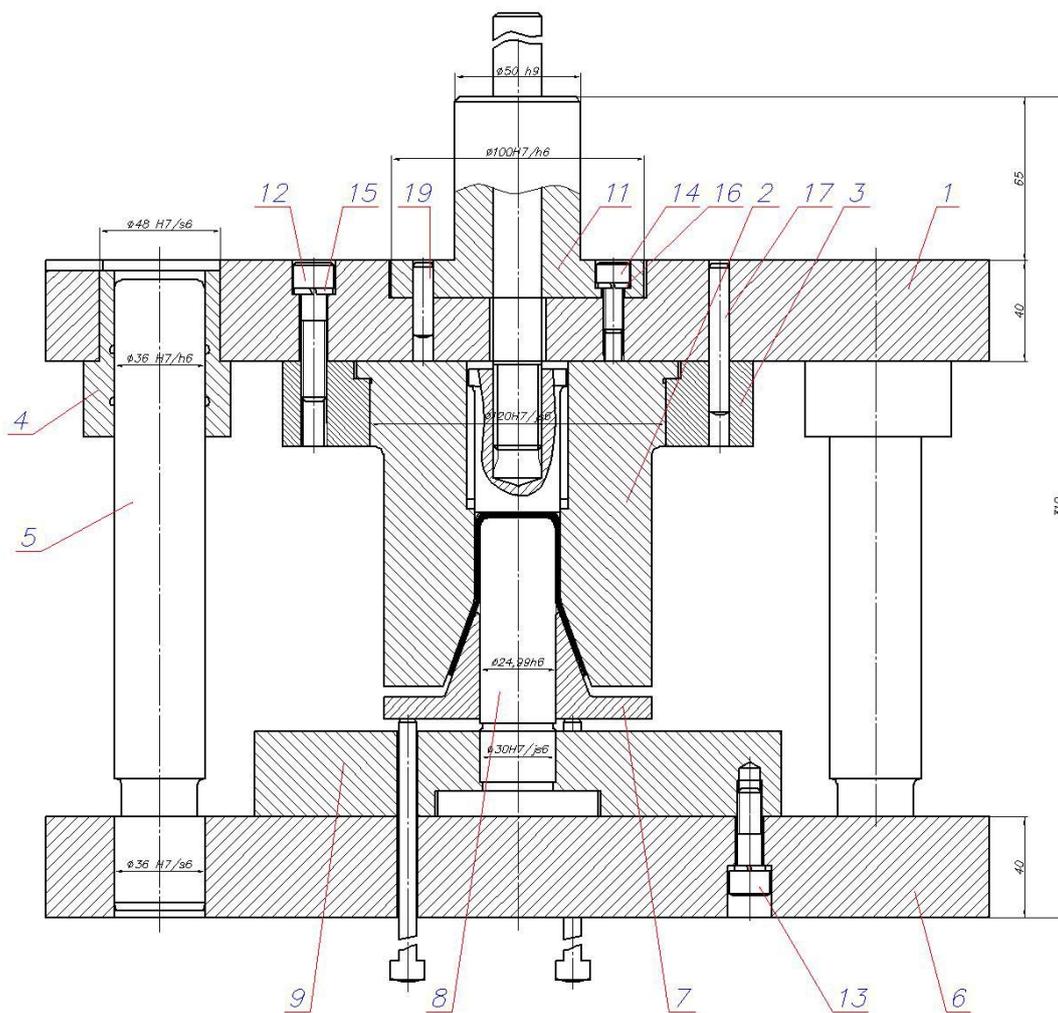


Рис. 7. Штамп для совмещенных операций

Особенностью данного штампа является то, что вытяжной пуансон установлен на нижней плите, а вытяжная матрица - на верхней. У пуансона расположен прижим, действующий посредством шпилек от пневматической подушки прессы. В исходном положении заготовка надевается на этот прижим. По окончании вытяжки этот же прижим снимает заготовку с пуансона, а верхний выталкиватель выбрасывает ее из матрицы.

Моделирование процесса.

Предметом исследования стало определение возможности вытяжки и анализ сопутствующих ей деформаций. Было проведено моделирование в программном комплексе AutoForm.

В результате моделирования было установлено, что процесс формоизменения идет стабильно, без образования складок.

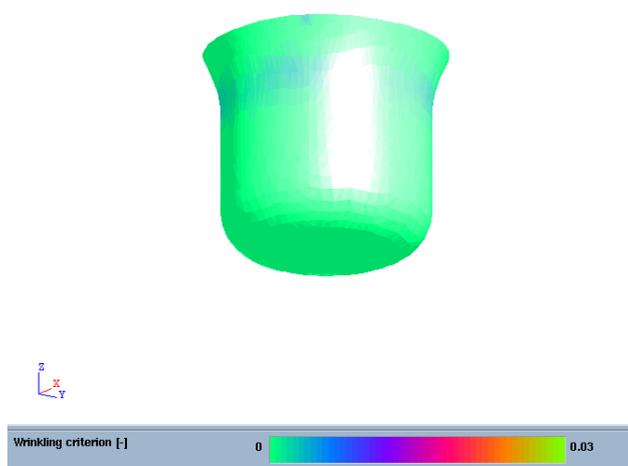


Рис. 8. Складкообразование

Контактные напряжения достигают до 40 Н/мм^2 . Максимальные напряжения отмечены в зоне перехода к доньшку и месте изгиба при раздаче.

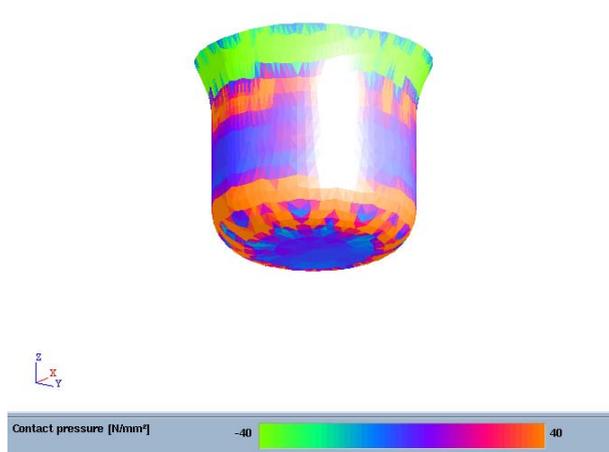


Рис. 9. Контактные напряжения

В зоне перехода к доньшку и месте изгиба наблюдаются наибольшие напряжения сдвига, достигающие 10 Н/мм^2 .

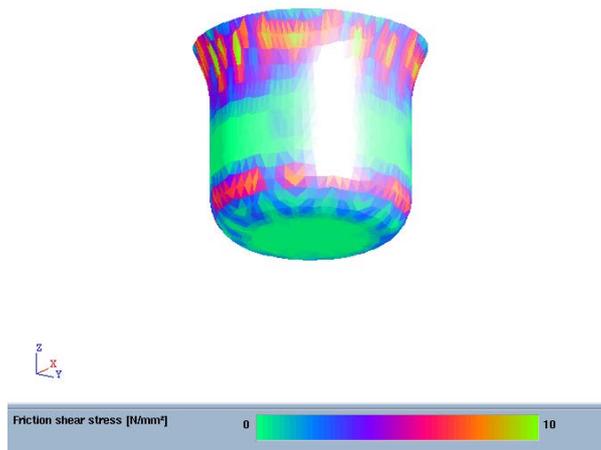


Рис. 10. Напряжения сдвига

Максимальные пластические деформации достигают 0,5 и располагаются в верхней части заготовки.

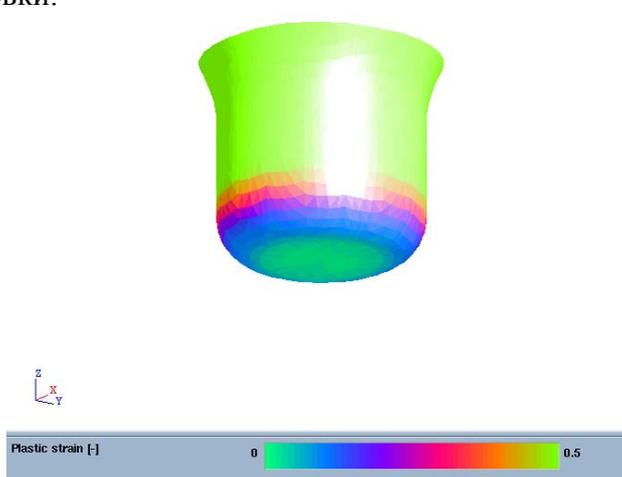


Рис. 11. Пластические деформации

Толщина меняется от 1,8 до 2,4 мм. Максимальное утонение наблюдается в зоне перехода к доньшку, а наибольшее утолщение - на краях заготовки.

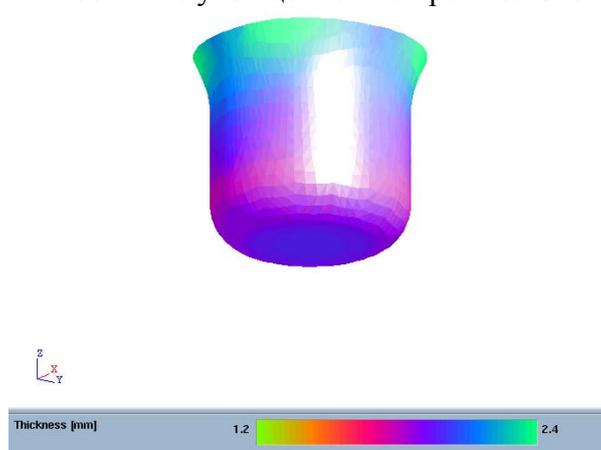


Рис. 12. Толщина

Процесс формоизменения идет стабильно, без образования дефектов.

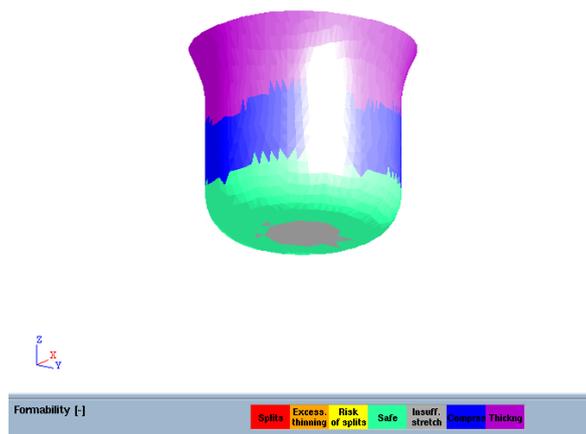


Рис. 13. Формоизменение

Выводы:

Совмещение нескольких различных операций в одном штамповом переходе позволило решить следующие задачи:

- повысить предельное формоизменение;
- расширить технологические возможности штамповки путем уменьшения напряжений и величин деформаций, не превышающих предельные;
- уменьшить номенклатуру штамповой оснастки и количество оборудования, необходимого для изготовления детали;
- повысить производительность труда за счет сокращения подготовительно-заключительного, вспомогательного и машинного времени;
- улучшить качество получаемых деталей.

Литература

1. *В.П.Романовский*. Справочник по холодной штамповке. Ленинград: Машиностроение, 1979 - 516 с.
2. *Л.И.Рудман* Справочник конструктора штампов: Листовая штамповка / - М.: Машиностроение, 1988 - 496 с.
3. *Е.А.Попов, В.Г.Ковалев, И.Н.Шубин*. Технология и автоматизация листовой штамповки. Москва «Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана», 2003 – 479 с.

Секция №8
Материаловедение в машиностроении

УДК 621.785

ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ: КАРБЕНИТРАЦИЯ. СТРУКТУРА И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КАРБЕНИТРИДНЫХ СЛОЁВ СТАЛИ 25Х2М1Ф

Анжелика Эдуардовна Гордей

*Студентка 5 курса,
кафедра «Материаловедение»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: В.И. Гришин,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана.*

Химико-термическая обработка является наиболее распространенным, технически эффективным и экономичным методом повышения ресурса работы деталей машин и инструмента. Высокие эксплуатационные свойства изделия получаются путём изменения состава и структуры не во всем сечении, а лишь в пределах тонкого поверхностного слоя толщиной от нескольких микрон до нескольких миллиметров. Известно, что именно качество поверхностный слой в указанных пределах толщины определяет такие важнейшие свойства как износостойкость, задиростойкость, усталостную прочность, сопротивление коррозии и, в основном, именно эти характеристики определяют долговечность и выход из строя деталей машин и различных механизмов.

Среди известных способов поверхностного упрочнения металлических изделий ввиду высокой технической и экономической эффективности наибольшее распространение в машиностроительной промышленности находят различные методы химико-термической обработки: цементация, нитроцементация, жидкостное и газовое цианирование, азотирование, борирование. Все названные процессы отличает большая трудоемкость, энергоёмкость, длительность технологического цикла. Большинство технологий требует для своего осуществления высокотемпературных нагревов, результатом которых являются нежелательные структурные превращения материала сердцевины деталей, сопровождающиеся значительными объемными эффектами, что в результате ухудшает качество металлической основы и приводит к потере геометрической точности обрабатываемых изделий. При реализации указанных методов упрочнения необходимо обязательно учитывать себестоимость дополнительных операций термической и механической обработки, обязательных для технологических процессов, но весьма трудоемких и часто технически сложных для исполнения.

Из сказанного выше становятся очевидными преимущества низкотемпературных процессов поверхностного упрочнения. Ввиду малой диффузионной подвижности элементов при пониженных температурах во внимание могут приниматься лишь методы насыщения такими элементами, которые проникают в металлическую основу не только диффузионным, но и реакционным путем, образуя соединения между атомами основы и атомами поверхностно-легирующего элемента. И в этом случае речь прежде всего идет об азоте и углероде, способных даже при температуре ниже 600 °С образовывать с железом и другими легирующими элементами, входящими в состав стали или чугуна, соединения в виде карбидов, нитридов, карбонитридов.

Также принципиальное значение имеет агрегатное состояние насыщающей среды. Например, для обработки в газовой атмосфере обязательным условием является

постоянная принудительная депассивация насыщаемой поверхности[1]. При любой даже самой тщательной предварительной очистке поверхность сталей, особенно нержавеющей, находится в пассивированном состоянии из-за присутствия тонкой пленки окислов и других пассивирующих слоёв. Стадия депассивации удлиняет цикл обработки, и при недостаточно строгом её контроле и может отрицательно сказываться на качестве обрабатываемой детали (разнотолщинность, отсутствие или прерывистость диффузионного слоя по периметру). Недостатки, описанные выше, отсутствуют в расплавных технологиях. При погружении металла в расплав солей на границе металл-расплав непрерывно начинают протекать естественные обменные реакции и пассивирующие пленки уже не могут существовать (идет непрерывное растворение мономолекулярного слоя на поверхности металла). Это приводит к тому, что процесс насыщения в жидкой среде протекает с максимально возможной скоростью, причем насыщение начинается непосредственно с момента погружения детали в расплав. Кроме того скорость нагрева в расплавах 2...5 раз выше чем при традиционных видах обработки (электронагрев, газовый нагрев, нагрев плазмой тлеющего разряда), а открытое зеркало ванны дает возможность в широких пределах регулировать скорость охлаждения после насыщения и при необходимости производить обработку детали частичным погружением в расплав. Также в отличие от газов, жидкости не обязательно использовать в герметичных системах.

История низкотемпературного процесса насыщения сталей азотом и углеродом в жидких средах берёт начало с 30-х годов прошлого столетия, когда Д.А. Прокошкин [2, 3] сообщил о возможностях жидкостного цианирования, его простоте и высокой эффективности.на основе исследований в СССР и США была предложена технология низкотемпературного цианирования инструмента и деталей машин в расплавах цианистых солей (цианиды). Впервые было отмечено, что поверхностное упрочнение при низкотемпературном процессе связано не с формированием мартенситных структур, как в случае высокотемпературного цианирования, а с образованием нитридов и карбонитридов, и сам процесс протекает в условиях, исключаящих $\alpha \rightarrow \gamma$ превращение, как это имеет место при других видах поверхностного упрочнения (цементация, нитроцементация, высокотемпературное цианирование, поверхностная закалка). Поэтому локальные разогревы деталей в месте контакта при трении, контактном нагружении не приводят к местному разупрочнению азотированных и карбонитрированных слоев, структура которых сформировалась при температурах выше 500°C , чего нельзя избежать в случае мартенситных структур, получаемых при закалке и низком отпуске. Это объясняет и предельно малые величины деформации и коробления деталей при низкотемпературном насыщении деталей азотом (газовое азотирование) и азотом и углеродом (цианирование, а в последующем и жидкостное азотирование, карбонитрация).

В 50-х годах XX в. Фирма «Дегусса» (ФРГ) внесла коррективы и предложила состав ванны, содержащий наряду с цианидами 50% цианатов щелочных металлов и тем самым положила начало знаменитому «Tenifer процессу» – «мягкому азотированию» [4]. По сравнению с цианированием «ядовитость» процесса сократилась вдвое и технология получила распространение более чем на 1000 машиностроительных предприятиях многих западных стран и Японии.

В дальнейшем при исследовании химизма данного процесса было установлено, что реакции в расплаве идут путём окисления:



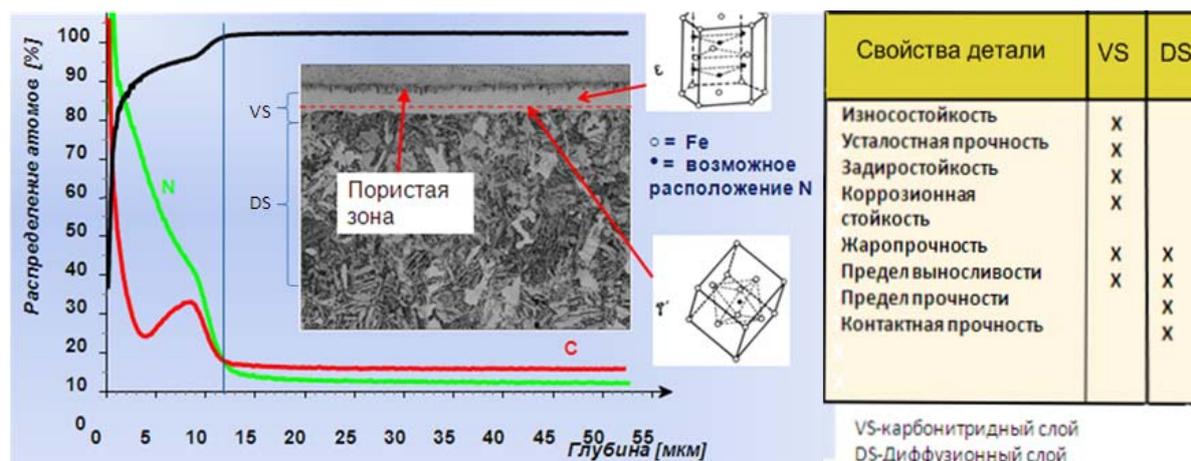


Рис. 1. Структура и свойства карбонитридного слоя стали 25X2M1Ф

В процессе участвует не сам цианид, а продукт его окисления цианат, который ядовитым не является.

Основными компонентами ванны карбонитрации являются цианат (KNCN) и карбонат калия (K_2CO_3). Было проведено немного работ по проблемам влияния химического состава ванны на процесс карбонитрации. Однако однозначного ответа о влиянии на качество получаемого слоя получено не было. К примеру, Д.А. Прокошкин [2, 3] сделал выводы о том, что оптимальный состав ванны для карбонитрации должен содержать: 75...85 % цианата калия и 15...25% карбоната калия. Но в работах немецких учённых говорится, что содержание поташа может достигать 40 % [5]. В них утверждается, что при таком составе ванны не происходит сильных окислительных реакций и, как следствие, нет сильного порообразования, а также количество цианата достаточно, чтобы в слое соединений не образовывалась обеднённая азотом фаза Fe_4N .

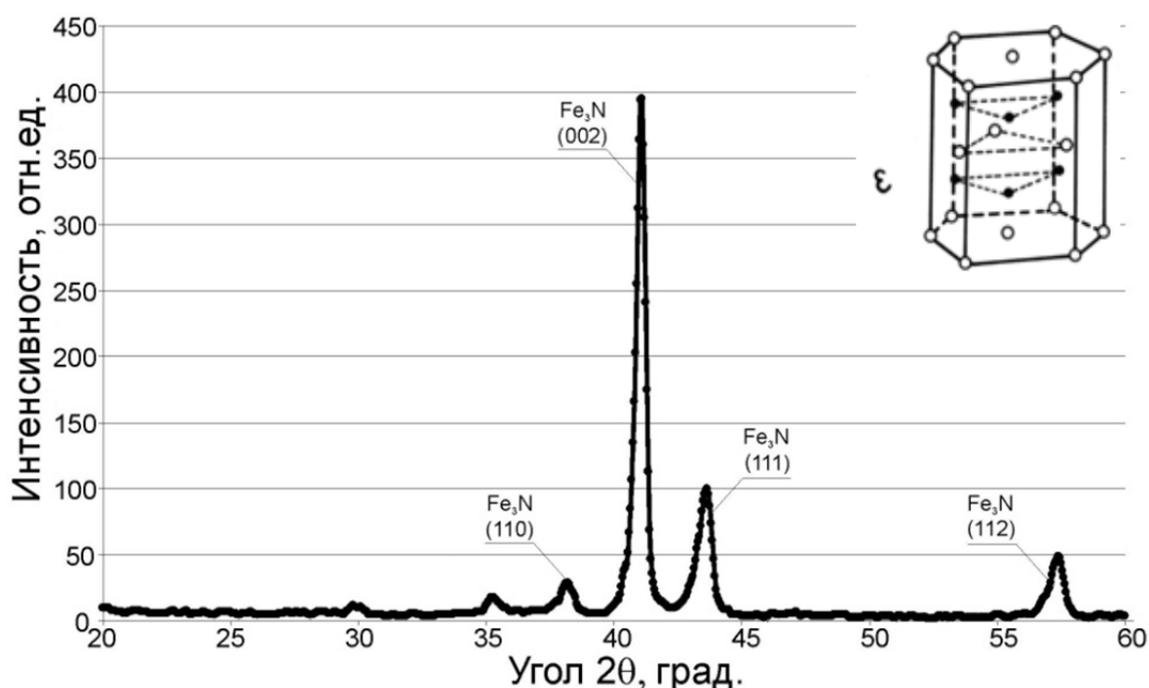


Рис. 2. Рентгенограмма ϵ -зоны упрочнённого слоя стали 25X2M1Ф

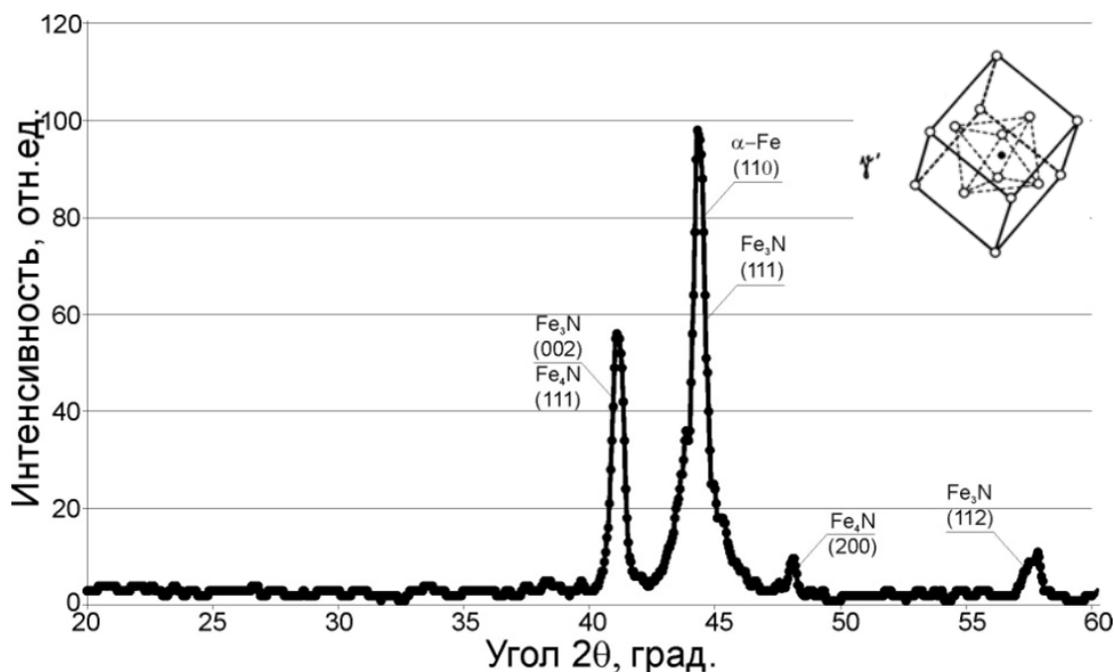


Рис. 3. Рентгенограмма γ' -фазы упрочнённого слоя стали 25X2M1Ф

Из исследований структуры и фазового состава стали 25X2M1Ф после карбонитрации было выявлено, что на поверхности образуется упрочненный слой, состоящий нескольких зон: зона ϵ -карбонитрида типа Fe_3N , под которым располагается зона γ' -фазы типа Fe_4N , толщина этих двух зон составляет 11 мкм. Диффузионная зона (гетерофазный слой), толщиной 105 мкм, состоит из твердого раствора углерода и азота в железе с включениями карбонитридных фаз, при чём что каждая его зона отвечает за определённое свойство (рис. 1). Толщина карбонитридного слоя 11 мкм, 105 мкм толщина диффузионного слоя. Металлографические исследования проводились на микроскопе Altami Met 5. Фазовый состав устанавливался с помощью дифрактометра ДРОН 3М (рис. 2, 3).

После карбонитрации в диффузионной зоне обнаружены и идентифицированы дисперсные частицы разной морфологии и разных размеров – нитрид ванадия VN (10...50 нм) и карбид молибдена Mo_2C (200...250 нм). а также выделения ϵ -нитрида $\text{Fe}_3(\text{N}_3\text{C})$ толщиной 1...5 мкм. В зоне α -твердого раствора специальных карбидов типа Me_7C_3 не обнаружено (рис. 4).

Часто после карбонитрации проводят оксидирование, так как это значительно повышает коррозионную стойкость. После данной операции на поверхности образуется плотный оксидный слой (Fe_3O_4), который и является ответственным за коррозионные свойства. Его толщина порядка 5...7 мкм (рис. 5).

Для выявления наилучшего состава ванны были проведены исследования свойств изделий из стали 25X2M1Ф после обработки в различных ваннах:

- с 20% содержанием K_2CO_3 (поташа)
- с 30% содержанием K_2CO_3 (поташа)
- с 40% содержанием K_2CO_3 (поташа)

Было выявлено, что:

- Износостойкость ниже при обработке в ванне с высоким содержанием поташа (рис. 6)
- При обработке в ванне с 40% содержанием поташа коррозионная стойкость выше, так как образовывается плотная оксидная плёнка Fe_3O_4

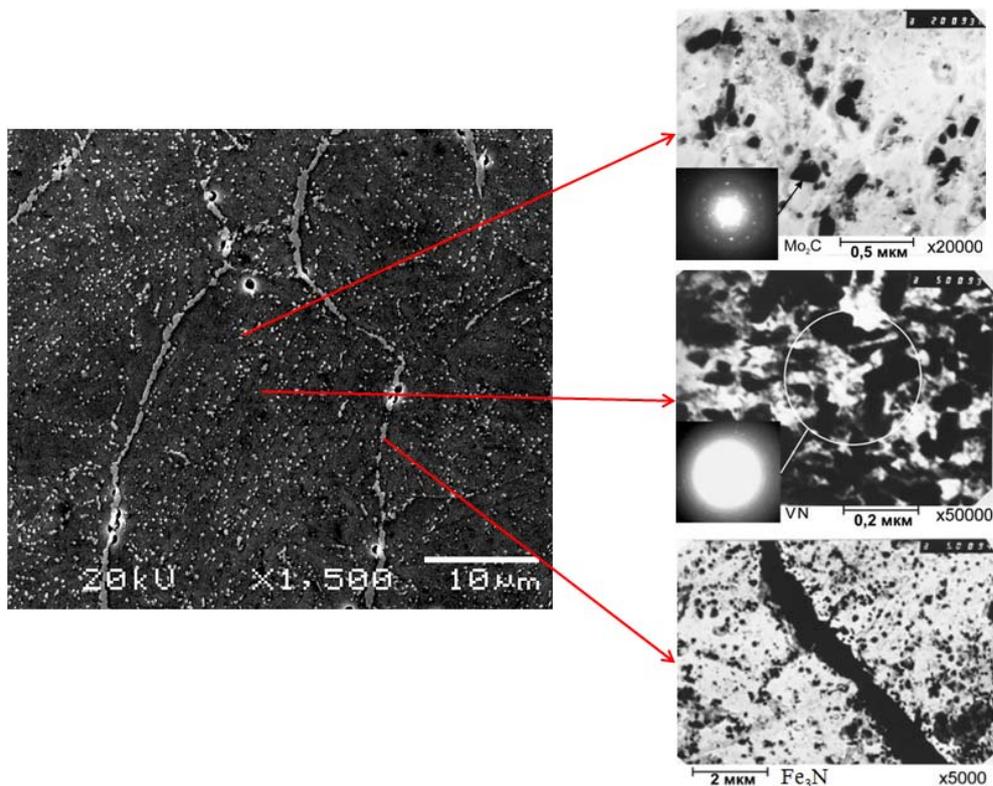


Рис. 4. Структура диффузионного слоя стали 25X2M1Φ после карбонитрации

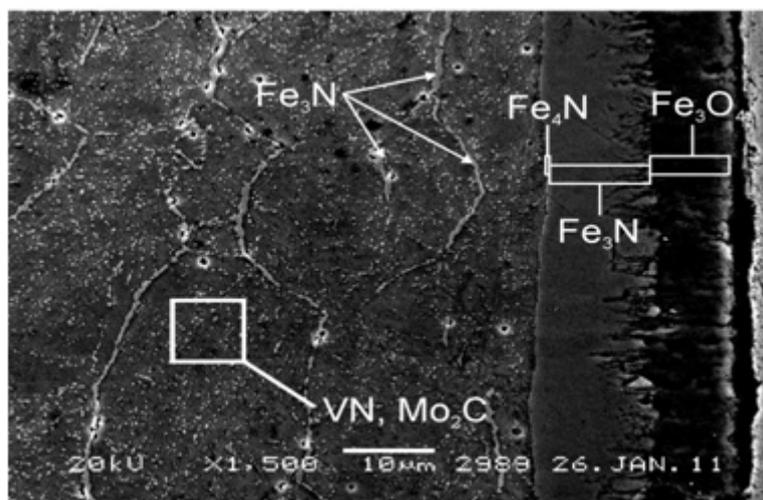


Рис. 5. Тонкая структура стали 25X2M1Φ после оксикарбонитрации.
Режим обработки: карбонитрация $T=580^{\circ}\text{C}$, $\tau=1.5$ ч + оксидирование $T=370^{\circ}\text{C}$, $\tau=0.25$ ч.

Твёрдость нашей стали 25X2M1Φ после карбонитрации по НВ 457, HRC 65.

После измерения твёрдости стали 25X2M1Φ мы получили: по НВ 457, HRC 65. Распределение микротвёрдости по толщине упрочнённого слоя представлено на рис. 7. Процесс карбонитрации прост в осуществлении. Чаще всего, в зависимости от требуемых свойств, он состоит из трёх основных составляющих: подогрев детали, обработка в расплавах солей и оксидирование (рис. 8).

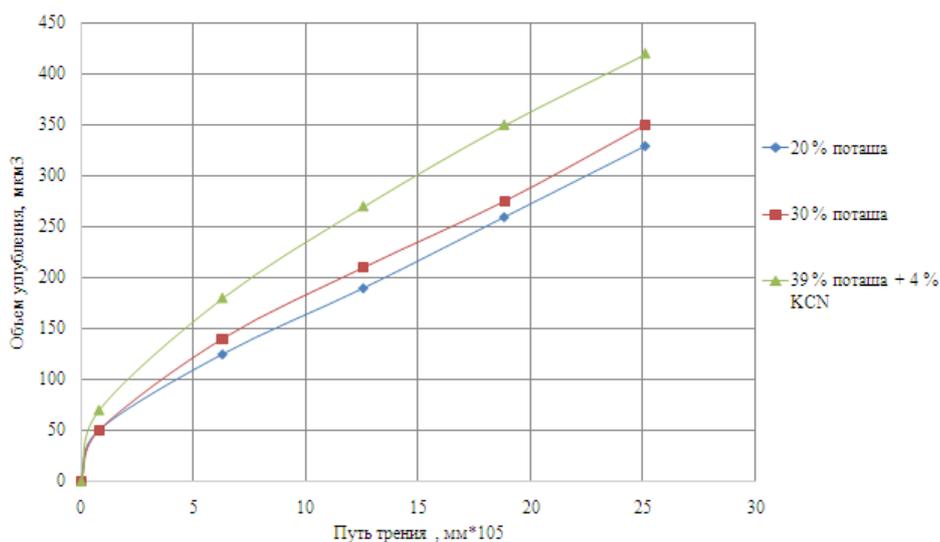


Рис. 6. Зависимость износоустойчивости упрочненного слоя от пути трения после:
 - Карбонитрации (K_2CO_3 20%) 570 °С, 1.5 часа,
 - Tenifer процесс (K_2CO_3 40%) 570 °С, 1.5 часа

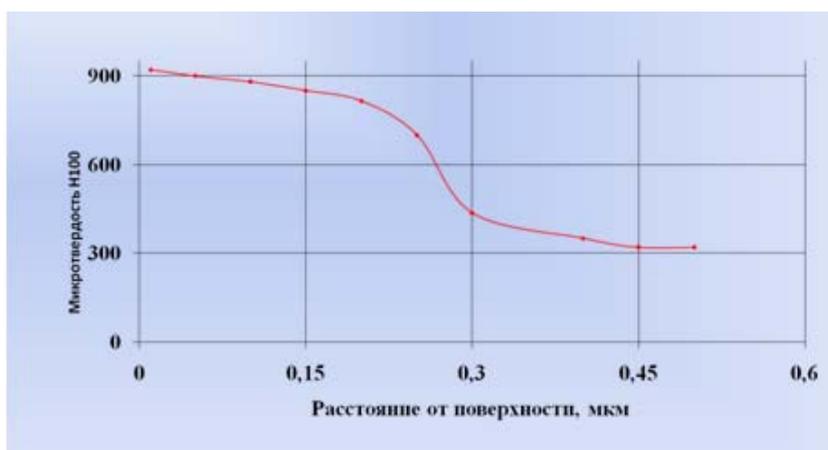


Рис. 7. Распределение микротвёрдости по толщине слоя стали 25X2M1Ф после карбонитрации при 570°С в течении 3 ч.

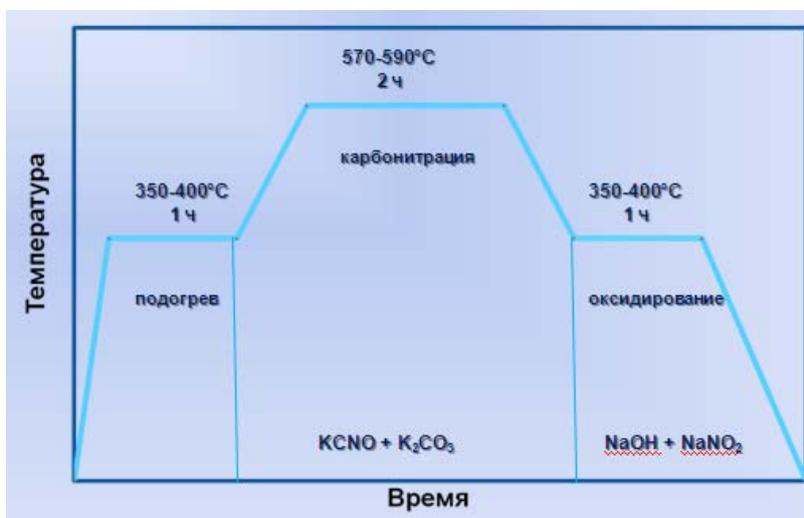


Рис. 8. Технологическая схема процесса карбонитрации

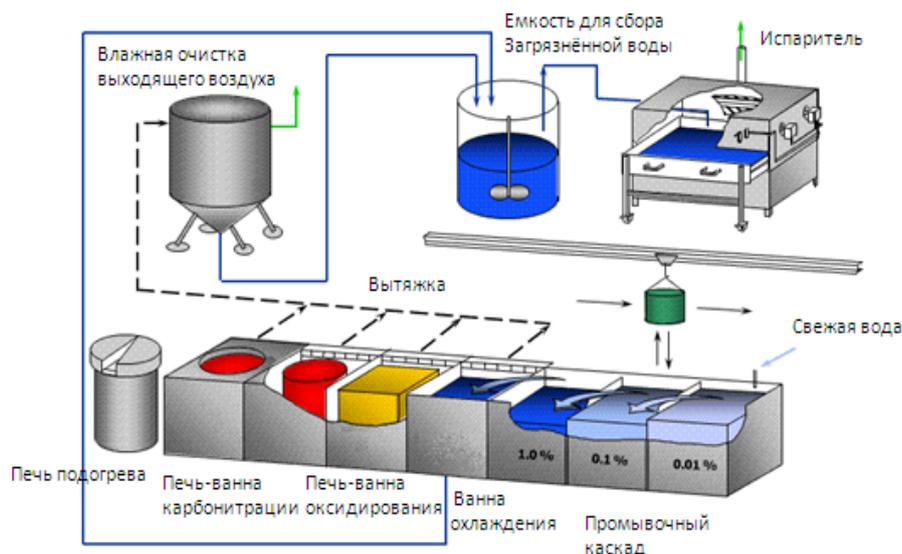


Рис. 9. Экологически чистая технологическая линия термической и химико-термической обработки

Проведение подогрева имеет большое значение для сокращения времени выдержки в ванне, достижения стабильности результатов карбонитрации и соблюдения безопасности при погружении деталей в расплав соли. Также важно выбрать правильный режим карбонитрации, так как от этого зависят окончательные свойства изделия. Очень часто после карбонитрации делают окисливание, так как это значительно повышает коррозионную стойкость.

Благодаря развитию технологий, в настоящее время процесс карбонитрации проводится в экологически чистой линии оборудования, представленной на рис. 9. Отличительной чертой такого оборудования является то, что оно снабжено фильтром влажной очистки отходящих газов и испарителем промстоков. Таким образом, современные расплавные технологии не имеют жидких отходов, не требуют промышленной канализации, и такое оборудование может быть размещено даже в цехах механической обработки.

По результатам всех проведённых исследований были сделаны **выводы**:

1. Упрочненный слой стали 25X2M1Ф после карбонитрации состоит из 3-х зон – зоны ϵ -фазы (Fe_3N) имеющей гексагональную решетку, толщиной 11 мкм, зоны γ' -фазы (Fe_4N), толщиной до 2 мкм и зоны α -твердого раствора внедрения азота и углерода в железе, с включениями дисперсных частиц, значительной протяженности. После карбонитрации в диффузионной зоне обнаружены и идентифицированы дисперсные частицы разной морфологии и разных размеров – нитрид ванадия VN (10...50 нм) и карбид молибдена Mo_2C (200...250 нм). а также выделения ϵ -нитрида $Fe_3(N,C)$ толщиной 1...5 мкм. В зоне α -твердого раствора специальных карбидов типа Me_7C_3 не обнаружено.

2. Износостойкость ниже при обработке в ванне с высоким содержанием поташа. При обработке в ванне с 40% содержанием поташа коррозионная стойкость выше, так как образовывается плотная оксидная плёнка Fe_3O_4 .

3. Получили наглядную картину распределения микротвёрдости по толщине упрочнённого слоя.

Литература

1. *Libasch R.* Harder Stainless Practikal. Steel, 1958, v. 142, № 28
2. *Прокошкин Д.А.* Химические и термические методы обработки стали. - М.-Л.: ОНТИ, 1938.
3. *Прокошкин Д.А.* Теория и практика цианирования быстрорежущих сталей. - М.: ВНИИТОМ, 1940.
4. *Prospekt.* Tenifer Degussa, Abteilung Durrferit, Frankfurt am Main, 1964
5. *Ulrich Baudis, Michael Kreutz.* Technologie der Salzschnmelzen. Landsberg: Verlag Modern Industrie, 2001, – 82с.

УДК 620.1

ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗАКАЛКИ МАРТЕНСИТНОСТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ ТИПА ВКС-180 С ЦЕЛЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Наталья Александровна Якушева

*Студентка 5 курса,
кафедра «Материаловедение»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научные руководители: А.Б. Шалькевич⁽¹⁾, Е.С. Маркова⁽²⁾, Л.В. Тарасенко⁽³⁾,
кандидат технических наук, начальник лаборатории высокопрочных конструкционных
и коррозионностойких сталей ФГУП «ВИАМ»⁽¹⁾,
ведущий инженер лаборатории высокопрочных конструкционных и
коррозионностойких сталей ФГУП «ВИАМ»⁽²⁾,
доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана⁽³⁾*

В настоящее время для разработки деталей ГТД конструкторами и материаловедцами ведется активный поиск новых материалов для валов турбин, превосходящих по прочностным параметрам (при сохранении характеристик надежности) традиционно применяемые мартенситные стали ЭП517 и ЭП866 [1].

Высокопрочные стали в планере современного самолета продолжают занимать существенное место и составляют 15...20 % от его общей массы. Это обусловлено наличием у этих материалов наиболее оптимального сочетания, по сравнению с другими материалами, высокой статической и усталостной прочности с хорошей технологичностью, а также сравнительно низкой стоимостью. Определенным преимуществом является и возможность уменьшения массы конструкций при использовании высокопрочных сталей.

В то же время требования к высокопрочным сталям все более возрастают. Они должны надежно работать во все более жестких климатических условиях, в том числе морских.

Одним из путей дальнейшего прогресса в использовании высокопрочных материалов является поиск новых композиций сталей и сплавов и более простых способов упрочнения. Так как углерод не только повышает предел прочности, но и одновременно увеличивает склонность сталей к хрупкому разрушению, можно было

ожидать, что лучшее сочетание механических свойств, в частности высокой прочности, высокой пластичности и вязкости, может быть достигнуто на безуглеродистых материалах, упрочняемых старением. Исследования в этом направлении привели к созданию принципиально нового класса высокопрочных материалов – мартенситностареющих сталей, появившихся в конце 20 века [2].

Мартенситностареющие стали можно использовать в широком диапазоне температур (от криогенных до 400...500 °С).

В настоящее время, по данным зарубежных источников, мартенситностареющие стали применяют для изготовления тяжелонагруженных деталей: подводные крылья, отдельные узлы двигателей, деталей рефрижераторных и криогенных установок, а также обшивки судов.

В качестве перспективных материалов, которые обладают требуемым комплексом механических свойств и характеристик надежности, для изготовления валов двигателей могут рассматриваться высокопрочные конструкционные мартенситностареющие стали (ВКС) системы легирования Fe-18Ni-8Co-5Mo-Ti. Во Всероссийском институте авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ») для возможного решения этой задачи, была разработана мартенситностареющая сталь с 18 % Ni, обеспечивающая предел прочности $\sigma_B = 1720...1865$ МПа, работоспособная до температур 400 °С (ВКС-180) (Патент RU № 2334017).

Особенностью мартенситностареющих безуглеродистых сталей ($C \leq 0,03$ %) с 18 % Ni, легированных кобальтом и молибденом, титаном и алюминием, является получение в результате закалки высокопластичного безуглеродистого мартенсита, который при последующем старении упрочняется за счет интерметаллидного упрочнения при температурах (450...500 °С). Упрочнение происходит за счет выделения высокодисперсных фаз типа Ni_3Ti и Ni_3Al . Однако практика показала, что введение в стали титана предпочтительнее, так как частицы основной упрочняющей фазы Ni_3Ti являются более высокодисперсными, чем частицы фазы Ni_3Al . В сталях, упрочняемых титаном, обеспечивается более высокая пластичность и ударная вязкость. Поэтому алюминий при выплавке этих сталей используется в основном в качестве раскислителя и его содержание ограничивается на уровне ~ 0,1 %.

Эти стали характеризуются высокой технологичностью. Закалка для этого класса сталей является смягчающей обработкой. Твердость в закаленном состоянии относительно невысокая и составляет 26...34 HRC, что позволяет выполнять все виды механической обработки без затруднений, изготавливая практически полностью готовые детали с незначительными припусками под чистовые размеры.

При высоком уровне прочности сталей ($\sigma_B \geq 1700$ МПа) необходимо обеспечить высокую чистоту металла по неметаллическим включениям. Исследованиями было установлено, что для получения требуемого комплекса механических свойств и при низкой анизотропии в мартенситностареющих сталях должно быть минимизировано содержание серы и фосфора, причем содержание каждого из этих элементов не должно превышать 0,01 % [1]. Также должно быть минимизировано содержание углерода и азота путем использования в металлургическом производстве различных переплавов: вакуумно-дугового (ВДП) и электронно-лучевого (ЭЛП).

Углерод в сталях рассматриваемой системы легирования является вредным элементом, так как обладает высоким химическим сродством к титану и образует с ним труднорастворимые при закалке карбиды или карбонитриды. При замедленном охлаждении крупногабаритных полуфабрикатов в области температур деформации (~ 1000 °С) частицы этих соединений выделяются в виде скоплений либо по границам зерен, что приводит в дальнейшем к резкой потере пластичности сталей и может

спровоцировать хрупкие разрушения. Кроме того, связывание титана в карбиды или карбонитриды приводит к снижению его содержания в твёрдом растворе, что снижает прочность при старении.

Для обеспечения на высокопрочных низкоуглеродистых мартенситностареющих сталях оптимального комплекса характеристик прочности и надежности материала, необходимо использовать вакуумные методы выплавки, чистые шихтовые материалы, специальные способы раскисления.

В качестве раскислителей и модификаторов для мартенситностареющих сталей используются щелочноземельные и редкоземельные элементы (кальций или магний, лантан и бор) в количестве 0,03...0,05 %. Эти элементы обеспечивают достаточно глубокое раскисление, способствуют формированию преимущественно глобулярных неметаллических включений, уменьшают концентрацию вредных примесей в твердом растворе и улучшают состояние границ зерен.

Многочисленные исследования, выполненные в ФГУП «ВИАМ» по разработке составов, освоению металлургического производства высокопрочных низкоуглеродистых конструкционных мартенситностареющих сталей, показали, что наименее газонасыщенный и наиболее чистый металл получается при использовании «дуплекс» вакуумной выплавки: вакуумно-индукционная выплавка с последующим вакуумно-дуговым переплавом - «ИД» (ВИ + ВДП). Такой способ выплавки сталей рассматриваемой системы легирования обеспечивает содержание углерода на уровне $C \leq 0,02$ %. Однако, даже при столь низком содержании углерода, мартенситностареющие стали склонны к образованию выделений карбонитридов по границам зерен, что вызывает снижение пластичности. Поэтому одной из перспективных задач по улучшению свойств является снижение содержания углерода до $C \leq 0,01$ % [1].

Одним из самых эффективных способов получения высококачественных металлов является применение прогрессивных металлургических методов, в первую очередь – электронно-лучевого переплава (ЭЛП). Многочисленными исследованиями установлено, что в условиях ЭЛП реакция обезуглероживания мартенситностареющих сталей получает большее развитие, чем процесс взаимодействия кислорода с титаном и алюминием.

Таким образом, в отечественной металлургии более эффективным является «дуплекс» метод выплавки «ИЛ», включающий в себя вакуумно-индукционную выплавку с последующим электронно-лучевым переплавом (ВИ + ЭЛП), позволяющий получить в 18 % Ni мартенситностареющих сталях углерод $C \leq 0,01$ % [3].

Следует отметить, что после горячей деформации мартенситностареющих сталей (полуфабрикатов больших сечений) структура получается разнотернистая (балл зерна от 0 до 5 шкалы ГОСТ 5639). При этом по границам зерен может присутствовать большое количество частиц карбонитридов титана, которые образуются при медленном охлаждении в интервале температур 1050...750 °С после нагрева до температур 1200 °С. Закалка в области температур ~ 800 °С не исправляет исходных дефектов структуры, так как при этой температуре не происходит ни растворение неметаллических включений, ни перекристаллизация. Частицы карбонитрида титана приводят к ослаблению границ зерен и, как следствие, к потере прочностных характеристик и к крайне низким значениям пластичности, особенно в поперечном направлении – сужение падает до $\psi \approx 5$ %.



Рис. 1. Мартенситностарееющая сталь. Охрупченное состояние

Типичная микроструктура 18 % Ni мартенситностарееющих сталей в охрупченном состоянии (медленное охлаждение с температур деформации) приведена на рис. 1.

Проблему устранения влияния на пластичность (ψ) охрупчивания в 18 % Ni мартенситностарееющих сталей, в том числе и стали ВКС-180, специалисты решают следующим образом. Для растворения охрупчивающих выделений проводят высокотемпературную закалку при температурах нагрева 1050...1200 °С с охлаждением в воде.

Для последующего измельчения зерна проводят цикл закалок при температурах нагрева ~ 950 °С так же с быстрым охлаждением в воде. Применение такого цикла закалок позволяет повысить пластичность в поперечном направлении до $\psi = 30...50$ %. Для улучшения коррозионной стойкости сталей рассматриваемой системы легирования проводят закалку с температур ~ 800 °С с охлаждением на воздухе или в воде [1].

После закалки с 1150...1200 °С границы зерен без охрупчивающих выделений, величина зерна соответствует 2...3 баллу шкалы ГОСТ 5639. После 3-х кратной закалки обеспечивается измельчение зерна до ~ 7 балла.

Микроструктуры стали ВКС-180ИД после соответствующих термообработок приведены на рис. 2 и 3.

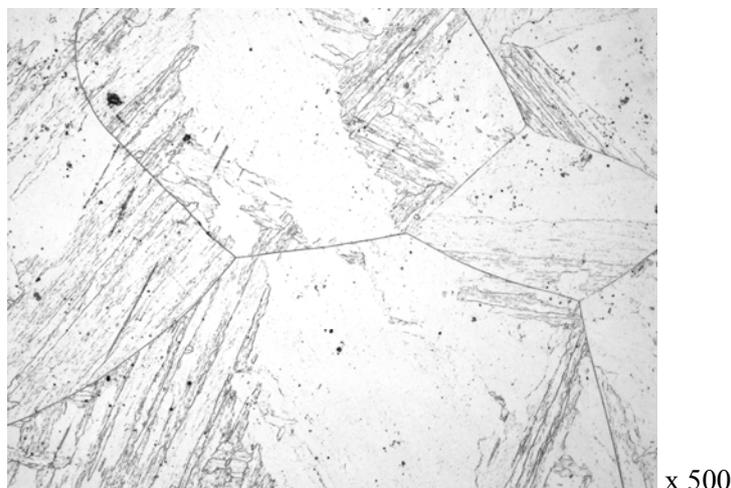


Рис. 2. Микроструктура стали ВКС-180ИД в состоянии после закалки с температуры 1200 ± 10 °С, 1 ч, охлаждение в воде

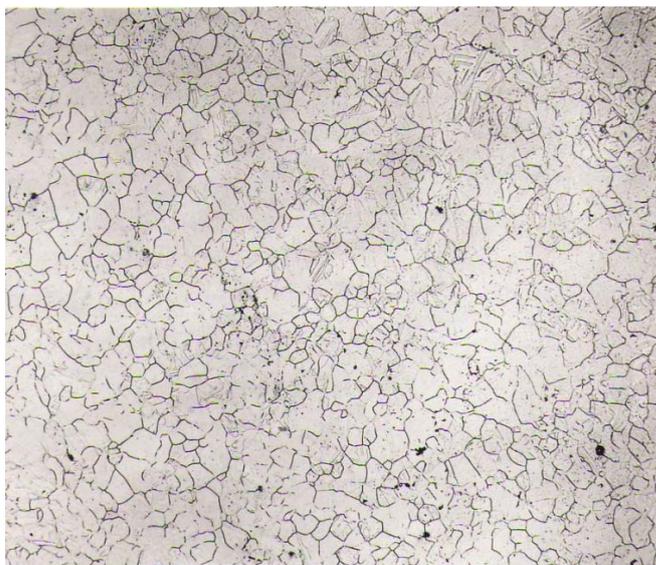


Рис. 3. Микроструктура стали ВКС-180ИД после цикла закалок:
 $1200 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, 1 ч, вода + 3 раза $940 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, 1ч, вода

Для обеспечения уровня прочности $\sigma_B = 1720 \dots 1865 \text{ МПа}$, соответствующего твердости $49,5 \dots 52 \text{ HRC}$, проводят старение при температуре $500 \dots 540 \text{ }^\circ\text{C}$.

Исследования, проведенные на кованных прутках промышленного изготовления в сорте квадрат 90 мм и квадрат 150 мм в долевом и поперечном направлениях, показали, что сталь ВКС-180ИД имеет высокие показатели механических свойств при низкой анизотропии. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Табл. 1. Механические свойства прутков стали ВКС180-ИД
 (квадрат 90 мм и квадрат 150 мм)

Направление вырезки образцов	HRC	σ_B	ψ
		МПа	%
Пруток квадрат 90 мм			
Долевые	52,0	1900	54,0
Поперечные	52,0	1910	47,0
Пруток квадрат 150 мм			
Долевые	51,5...52,0	1900	54,0
Поперечные	51,5...52,0	1920	48,5

В задачу настоящей работы входила разработка режима термической обработки для стали ВКС-180, изготавливаемую методом выплавки «ИЛ» (ВИ + ЭЛП), который бы обеспечивал получение однородной и мелкозернистой структуры с размером зерна ~ 7 балла по ГОСТ 5639 [1].

Можно предположить, что температура растворения карбонитридных включений для стали ВКС-180ИЛ с содержанием углерода $C \leq 0,01 \text{ } \%$ может быть существенно ниже $1200 \text{ }^\circ\text{C}$, которая необходима для стали ВКС-180ИД с содержанием углерода $C \leq 0,02 \text{ } \%$, и находится в области температур $1000 \dots 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ [4].

Поиск возможности снижения температуры первой закалки при сохранении комплекса механических свойств и характеристик надежности позволит повысить как энергоэффективность процесса термической обработки, так и технологичность стали ВКС-180 в производстве.



Рис. 4. Микроструктура стали ВКС-180ИЛ после цикла закалок:
1000 °С, 1 ч, вода + 3 раза 940 ± 10 °С, 1ч, вода



Рис. 5. Микроструктура стали ВКС-180ИЛ после цикла закалок:
1020 °С, 1 ч, вода + 3 раза 940 ± 10 °С, 1ч, вода

Были проведены исследования микроструктуры после термической обработки с различной температурой закалки. Микроструктуру оценивали на инвертированном металлографическом микроскопе «Olympus» GX-51 после электролитического травления шлифов по ГОСТ 5639 в растворе: 55 г. лимонной кислоты, 6 мл H_2SO_4 , 200 мл дистиллированной воды при силе тока $I = 1,5...2$ А, время травления 60...90 сек. Микроструктуры стали ВКС-180ИЛ после соответствующих термообработок приведены на рис. 4 – 8.

Последующий анализ микроструктуры стали ВКС-180ИЛ показал, что после закалки с температур 1000...1020 °С остаются следы карбонитридной сетки. После закалки при нагревах в интервале температур 1050...1100 °С следов сетки в микроструктуре не отмечалось. При этом проведении закалок в исследуемом интервале температур (с последующей 3-х кратной перекристаллизацией при 940 °С) во всех

случаях обеспечивается достаточно однородная мелкозернистая структура, соответствующая 6...8 баллу по ГОСТ 5639.

После этого были проведены испытания на растяжение по ГОСТ 1497-84 для определения пластичности (ψ) стали ВКС-180ИЛ. Исследования проводились на металле промышленной выплавки. Заготовки образцов вырезались в поперечном направлении из горячекатаных сутунок толщиной $\delta \approx 16$ мм. Температура испытаний 20 °С.



Рис. 6. Микроструктура стали ВКС-180ИЛ после цикла закалок:
1050 °С, 1 ч, вода + 3 раза 940 ± 10 °С, 1ч, вода

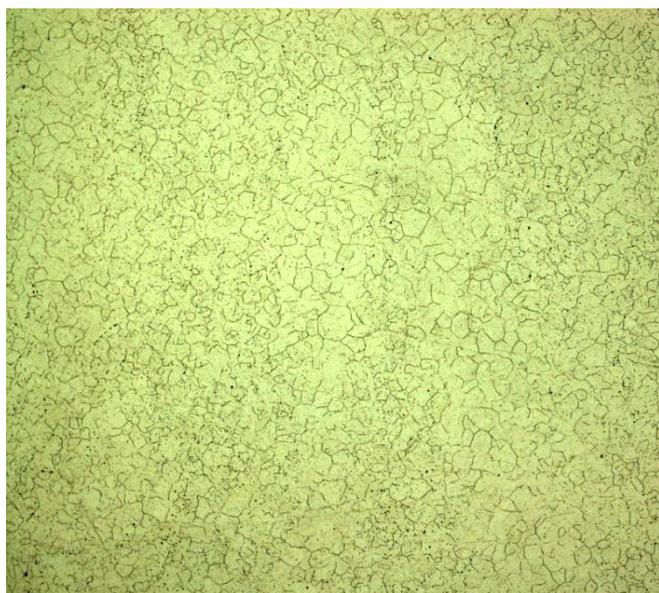


Рис. 7. Микроструктура стали ВКС-180ИЛ после цикла закалок:
1070 °С, 1 ч, вода + 3 раза 940 ± 10 °С, 1ч, вода

Свойства стали ВКС-180ИЛ после испытаний на растяжения приведены в табл. 2.

Табл. 2. Относительное сужение образцов из стали ВКС180-ИЛ

Температура первой заковки*, °С	Полуфабрикат	Направление вырезки образцов	σ_B , МПа	ψ , %
1000	Сутунка $\delta = 16$ мм	Поперечное	1800...1810	48,5
1020				48,5...50,0
1050				51,5...52,5
1070				50,0...55,5
1100				53,5...55,5
*- термическая обработка: охрупчивание + закалка (1000 – 1100) °С, вода + 3р. 940 °С, вода + 780 °С, воздух + 520 °С, 3ч, воздух				



х 100

Рис. 8. Микроструктура стали ВКС-180ИЛ после цикла закалок: 1100 °С, 1 ч, вода + 3 раза (940 ± 10) °С, 1ч, вода

При сравнении значений относительного сужения в поперечном направлении у образцов из стали ВКС-180ИД (табл. 1) и ВКС-180ИЛ (табл. 2) было установлено, что сталь ВКС-180ИЛ имеет уровень пластичности в поперечном направлении выше, чем сталь ВКС-180ИД. Данный эффект, по всей видимости, связан с тем, что с увеличением температуры заковки происходит большее растворение охрупчивающих фаз, что приводит к увеличению пластических характеристик.

Результаты, полученные на данном этапе работ, показывают перспективность дальнейших исследований по упрощению режимов термической обработки стали ВКС-180ИЛ. Снижение температуры первой заковки мартенситностареющей стали ВКС-180ИЛ по сравнению со сталью ВКС-180ИД не приводит к ухудшению микроструктуры этой стали, и получается достаточно однородная мелкозернистая структура. Кроме того, уменьшение содержания углерода до $C \leq 0,01$ % благодаря применению способа выплавки «ИЛ» позволяет обеспечить пластичность стали в поперечном направлении на высоком уровне ($\psi_{\text{поп}} \geq 45\%$). Однако однозначный вывод о корректировке температуры первой заковки возможно будет сделать после изучения полного комплекса механических свойств и характеристик надежности стали ВКС-180ИЛ.

Литература

1. *Шалькевич А.Б., Маркова Е.С., Покровская Н.Г.* «Мартенситностареющая сталь ВКС-180 – перспективный материал для двигателей ГТД», сборник лекций «Материал и энергосберегающие технологии для производства ответственных деталей высокоэффективных газотурбинных двигателей, промышленных энергетических силовых установок и приводов», - ФГУП «ВИАМ», 2010. - 115с.
2. *Перкас М.Д., Кардонский В.М.* Высокопрочные мартенситно-старееющие стали. – М.: Металлургия, 1970. - 224с.
3. *Ревякина О.К., Петраков А.Ф., Сачков В.В., Щербаков А.И.* «Усовершенствование мартенситностареющих сталей на основе системы Fe-Ni-Co-Mo-Ti», Металловедение и термическая обработка металлов. - М.: Машиностроение», 1981, - 65с.
4. Научно-технический сборник. Вопросы авиационной науки и техники. Авиационные материалы. Высокопрочные стали. 1986г, с.1-124 (ВИАМ)

Секция №9
Промышленный дизайн

ДИЗАЙН АВТОНОМНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА ДЛЯ СОРЕВНОВАНИЙ «ЕВРОБОТ»

Ярослава Андреевна Барменкова

*Студентка 6 курса,
кафедра «Промышленный дизайн»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: М.М. Михеева,
старший преподаватель кафедры «Промышленный дизайн»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Проект дизайна учебно-лабораторного автономного мобильного робота был выполнен в рамках дипломного проекта по специальности «Промышленный дизайн» в МГТУ им. Н.Э.Баумана на основе разработки студентов факультета «Робототехнические системы» для соревнований «Евробот 2011».

«Евробот» – это соревнования робототехников-любителей. По правилам соревнований робот должен расставить пешки на клетки своего цвета. Робот, который поставит больше фигур на свои клетки за время матча, станет победителем.

На момент начала дизайн-проекта конструкция робота была уже сформирована (рис. 1).

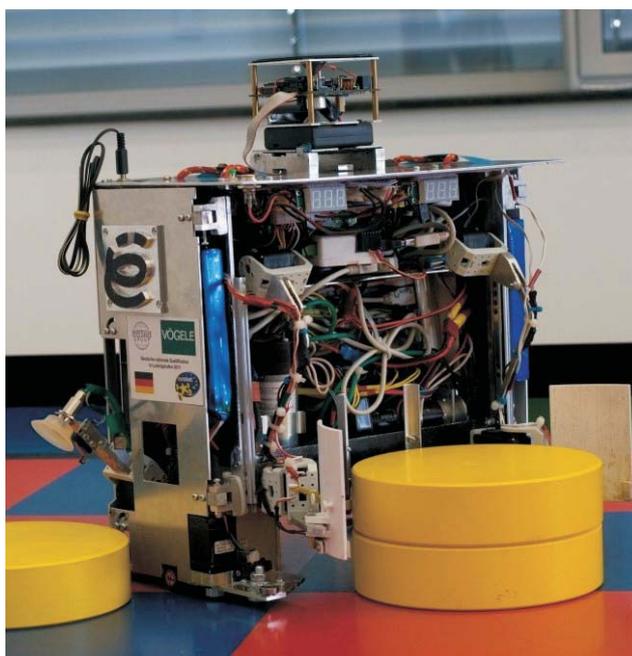


Рис. 1. Прототип робота

В процессе дизайн-исследований в результате изучения прототипа, общения с конструкторами, знакомства с условиями соревнования, а также с условиями эксплуатации и транспортировки робота были определены следующие требования к дизайн-разработке:

- маяк не должен быть ничем закрыт ни с одной из сторон;
- на боковых стенках должны быть предусмотрены отверстия для датчиков;
- ничего не должно мешать свободному движению манипуляторов робота;
- должен быть обеспечен быстрый доступ к внутренним элементам;

- должна быть предусмотрена возможность положить робота на бок;
- должна быть минимальная переделка существующей компоновки и несущей конструкции;
- необходимо избавиться от слишком острых углов;
- необходимо найти стиль и соответствующий образ для повышения престижа команды на соревнованиях международного уровня;
- убрать/скрыть беспорядок в проводах внутри робота;
- идентифицировать переднюю и заднюю стороны робота;
- распределить кнопки управления и дисплей с учётом требований эргономики и условий эксплуатации.
- обеспечить возможность переноса робота (ручки для переноса).
- предложить экономичный для изготовления робота в одном экземпляре способ реализации дизайн-решения.

В результате было предложено 2 дизайнерских решения, в основе которых лежат 2 разных способа производства для реализации одного экземпляра робота. Оба варианта при этом учитывают достаточно жёсткие требования конкурса и ряд ограничений установленных инженерами-разработчиками и решают задачи, поставленные в результате дизайн исследования.

В первом варианте (рис. 2) допускается более свободная работа над формообразованием, но производство такого корпуса в единичном экземпляре повлечёт за собой и большие расходы, так как предполагает выращивание на 3D принтере. Второй вариант (рис. 3) может быть изготовлен на опытном заводе МГТУ из стали толщиной 1,5 мм, вес корпуса при этом составит около 4500 г.

В рамках дизайн-проекта автором был изготовлен образец по варианту 1 (рис. 4) методом 3D прототипирования и образец по варианту 2 (рис. 5) путём ручного макетирования с последующей доводкой и покраской образцов.



Рис. 2. Вариант 1 дизайн-решения



Рис. 3. Вариант 2 дизайн-решения



Рис. 4. Макет выращен на 3D принтере



Рис. 5. Макет изготовлен вручную из ПВХ

УДК 338.242.2

СИСТЕМА ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМИ УСЛУГАМИ В ОБЛАСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ДИЗАЙНА

Андрей Игоревич Кленин

Аспирант 1 года,

кафедра «Финансы»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Е.В. Соколов,

доктор технических наук, профессор кафедры «Финансы»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Развитие рыночной экономики в России на современном этапе оказывает воздействие не только на хозяйствующие субъекты, но и на высшие учебные заведения. Реформирование экономических отношений проявилось в деятельности ВУЗов в сокращении объема финансирования, повлекшее за собой необходимость увеличения доли внебюджетных поступлений за счет самостоятельной экономической деятельности, приносящей доход. Общий объем финансирования образовательных учреждений высшего профессионального образования в 2010 г. сократился на 2,87% по сравнению с прошлым годом, а совокупность всех расходов на 0,86%. Статистическая информация по финансовой деятельности образовательных учреждений высшего профессионального образования представлена в табл. 1.

Переход к рыночным методам хозяйствования формирует новые требования к организации работы ВУЗов. Сложившаяся в России система управления образовательными услугами высших учебных заведений в настоящее время не соответствует в полной мере своему социальному предназначению по подготовке специалистов.

Табл. 1. Финансовая деятельность образовательных учреждений высшего профессионального образования, млн. руб.

Наименование	2009 г.	2010 г.
Объем финансирования - всего	581 389,0	564 679,8
Бюджетное финансирование	293 718,9	301 884,4
Внебюджетное финансирование	287 670,2	256 610,7
Собственные средства	...	6 184,6
Расходы - всего	510 056,0	505 664,2
Бюджетные расходы	265 597,2	270 336,3

Развитие рыночных отношений, интенсивный рост рынка образовательных услуг и количества высших учебных заведений в начале 2000-х годов привели к снижению общего уровня образования. Сегодня, потребность в специалистах высокого профессионального уровня для создания конкурентной экономики вновь приводит к развитию сферы образования и созданию обновленного рынка образовательных услуг. С этой целью происходит сокращение численности образовательных учреждений высшего профессионального образования. Статистическая информация по количеству образовательных учреждений и студентов, обучающихся в них, представлена в табл. 2.

Табл. 2. Число образовательных учреждений высшего профессионального образования и количество обучающихся студентов.

Все образовательные учреждения высшего профессионального образования	2009 г.	2010 г.
Количество образовательных учреждений	662	653
в них студентов, тыс. человек	6 135,6	5 848,7
принято студентов, тыс. человек	1 329,6	1 195,4

В 2011 г. государственные ВУЗы приняли на 137,7 тыс. человек меньше, чем в 2010 г. Недостаточное финансирование учебных заведений создает предпосылки к стоимостной оценке подготовки специалистов, требующей минимального количества затрат. Отсутствие обоснованных рекомендаций по функционально-структурной организации высших образовательных заведений приводит к диверсификации образовательной деятельности, неправильной оценке уровня спроса на вновь открываемые специальности, несоответствию материально-технической и кадровой обеспеченности лицензионным требованиям и, как следствие, к несостоятельности кафедр, факультетов и даже учебных учреждений.

ВУЗы относятся действующим российским законодательством к образовательным учреждениям, основной целью которых не является извлечение и распределение прибыли, однако могут осуществлять предпринимательскую или иную приносящую доход деятельность, если это служит достижению цели, ради которой они созданы. Возможная прибыль может быть распределена на совершенствование образовательного процесса и материально-технической базы. Следовательно, прибыль является одним из первичных финансовых ресурсов и показателем эффективности работы как коммерческой, так и некоммерческой организации.

Вышеизложенные положения обуславливают важность и объективную необходимость исследования и разработки различных современных подходов к совершенствованию управления образовательными услугами. Создание эффективной системы управления, соответствующей различным видам образовательных услуг и

способствующей повышению профессионального уровня подготовки специалистов, является важной и актуальной задачей.

Современные российские вузы являются достаточно активными участниками экономической жизни. В процессе их функционирования одновременно ставятся такие задачи, как максимизация прибыли и объема оказываемых услуг, выдержка необходимого набора образовательных программ, стоимости и качества образования.

Схема управления высшим учебным заведением, в соответствии с проведенным анализом основных протекающих процессов и методологией системного анализа, может быть представлена в виде трех блоков: вход системы, процесс управления, выход системы (рис. 1). Если обозначить высшее учебное заведение, как систему, а процесс оказания образовательных услуг, как процесс эксплуатации данной системы, то в качестве критерия эффективности работы системы может выступать доход, полученный в процессе образовательной деятельности в единицу времени.

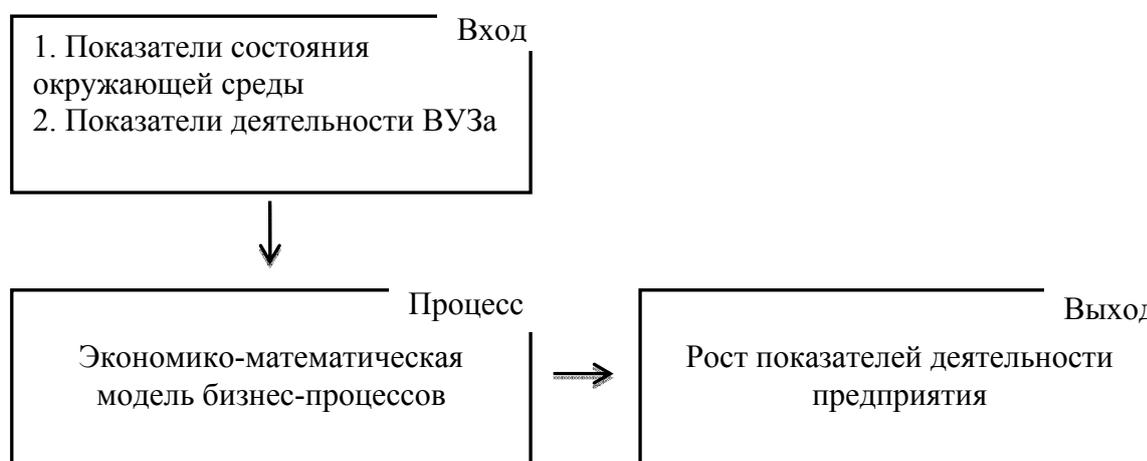


Рис. 1. Схема управления ВУЗом

Создание такой схемы управления высшим учебным заведением предполагает разработку нескольких экономико-математических моделей, соответствующих основным бизнес-процессам. Первая модель позволяет установить зависимость количества поступающих абитуриентов в конкретный ВУЗ от объема размещенной рекламы в различных источниках массовой информации. Решение поставленной задачи возможно при помощи корреляционного анализа видов рекламы и степенной многофакторной функции.

Вторая экономико-математическая модель позволяет учесть влияние ценовой политики образовательного учреждения на объем предоставляемых образовательных услуг. На основе экспертных данных, полученных во время проведения мероприятий по предоставлению скидок на некоторые образовательные программы, может быть установлена зависимость объема оказываемых при одном и том же количестве абитуриентов от стоимости обучения.

В соответствии с методологией системного анализа и предложенными экономико-математическими моделями, система управления образовательными услугами высших учебных заведений будет иметь следующий вид (рис. 2).

Процесс создания системы управления образовательными услугами высшим учебным заведением можно рассмотреть на примере программы подготовки специалиста в области промышленного дизайна. Целью промышленного дизайна является определение структурных и функциональных особенностей промышленно

производимых изделий, а также их внешнего вида. Потребность в специалистах данной области обусловлена необходимостью производства массовой продукции, привлекательной для потребителя и выгодной для производителя. Стремление к разработке недорогих в изготовлении, удобных и безопасных изделий приводит умелому сочетанию конструкции, материалов и форм специалистами-дизайнерами.

До недавнего времени промышленный дизайн являлся неотъемлемой частью производства.

Современные социально-экономические отношения, технологическая и информационная революции, сложившийся образ жизни способствуют интенсивному росту количества промышленных дизайнеров. Спрос, как в количественном, так и качественном аспекте, не соответствует в полной мере предложению. Рынок дизайнерских услуг еще не насыщен. Зачастую, заказчик является идейным автором того или иного дизайн-решения. Это связано с отсутствием высокого профессионального уровня у специалистов данной области.

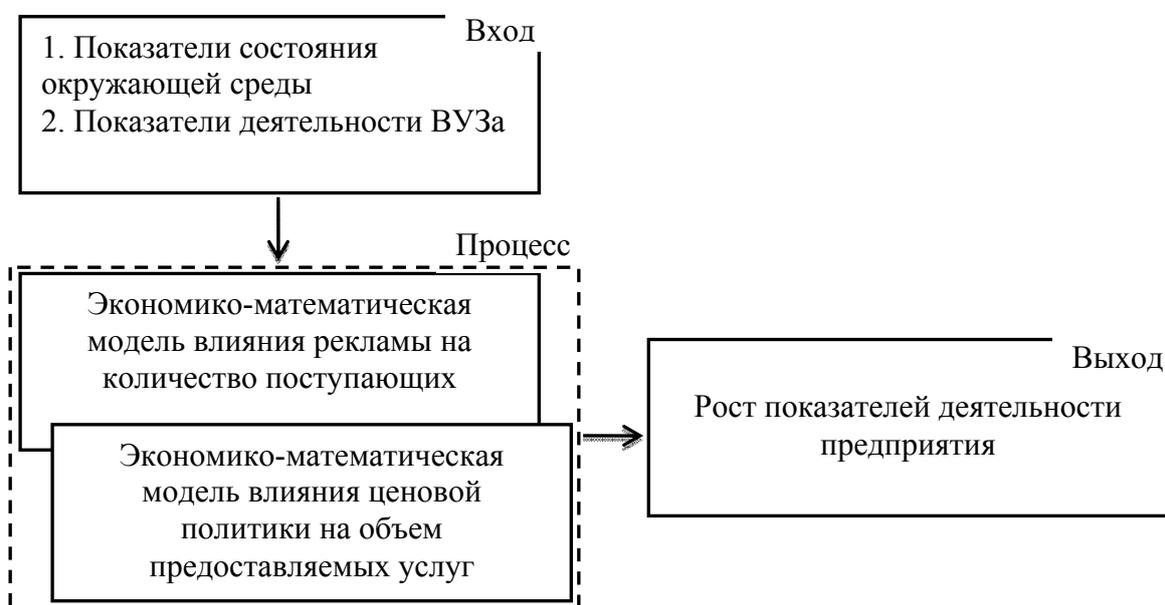


Рис. 2. Система управления образовательными услугами высшим учебным заведением

Смена приоритетов и направлений, общества, эры технического прогресса на экологическую эпоху формирует новые требования организации образовательными учреждениями подготовки специалистов-дизайнеров. Для этого необходим эффективный системный подход к современному управлению образовательными услугами, направленный непосредственно на улучшение качества процесса обучения ВУЗами и дающий студентам возможность развивать собственный заложенный потенциал, как в пределах, так и за пределами образовательных программ.

Изменяя различные параметры предложенной системы управления образовательными услугами в рамках подготовки специалистов в области промышленного дизайна, можно получить тот или иной результат на выходе системы. На рис. 2 изображена взаимосвязь входных параметров системы и результатов ее работы. Входом системы являются следующие показатели.

Показатели состояния окружающей среды ВУЗа:

- потребность в подобных специалистах;
- платежеспособность населения;
- конкуренция со стороны других учебных заведений;

Показатели деятельности ВУЗа:

- рейтинг и репутация;
- качество образования;
- профессорско-преподавательский состав.

Помимо этого, значительное влияние на результат работы предложенной системы оказывают, принимаемые руководством образовательных учреждений, управленческие решения различных уровней. Например, при внедрении экономико-математической модели влияния рекламы можно значительно увеличить количество поступающих на образовательную программу по промышленному дизайну. Используя данные о таких источниках массовой информации, как интернет, журнал, телевидение, радио, нетрудно определить долю целевой аудитории в совокупном охвате, стоимость размещения рекламы и целесообразность принятия данного решения.

Путем предоставления скидки на обучения можно повлиять на долю абитуриентов, которые еще не приняли решения в пользу той или иной образовательной программы, а может быть в пользу ВУЗа. Применение методов ценового стимулирования особенно актуально для образовательных учреждений, так как финансирования за счет бюджетных и внебюджетных средств напрямую зависит от объемов оказываемых образовательных услуг. Это также обусловлено тем, что все издержки подразделяются на условно-постоянные и условно-переменные. Условно-постоянные издержки представляют собой неизменное абсолютное выражение и не зависят от объема оказываемых услуг. В них включают расходы по аренде имущества, содержанию и текущему ремонту основных фондов, рекламе, электроэнергии и т.д. К условно-переменным издержкам, в первую очередь, относятся расходы по оплате труда преподавателей, сырья и материалов для процесса обучения, различного оборудования, инвентаря и пр.

В практике осуществления подготовки специалистов в области промышленного дизайна возможно определение объема реализуемых образовательных услуг в соответствии с возможным увеличением скидки, а также подбор системы скидок при возрастающем объеме реализации услуг. До проведения мероприятий по снижению стоимости обучения сложно предугадать результат, однако можно определить ожидаемую выгоду для каждого возможного объема образовательных услуг, предоставляемого под влиянием факторы сниженной цены.

Итак, использование системы управления образовательными услугами позволяет уменьшить потери от ошибок, связанных с принятием организационных решений руководством ВУЗа при подготовке специалистов в области промышленного дизайна. В целом данная система позволяет оптимизировать значение показателей прибыли и увеличить качество подготовки высококвалифицированных кадров в соответствии с имеющейся потребностью в специалистах той или иной области. Представленные модели позволяют оценить экономическую эффективность принимаемых решений по индивидуализации учебных планов студентов, составу групп и другим показателям. Путем анализа и исследования изменений выбранных параметров возможно достижение максимизации целевой функции, обеспечение экономической безопасности высшего учебного заведения, удержание сегмента рынка образовательных услуг.

Литература

1. Волков И.К. Случайные процессы. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.
2. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ. - М: Наука, 2009.
3. Поршнев А.Г. Управление организацией. - М.: ИНФРА, 2003.
4. Советов Б.А. Моделирование систем. - М: Высшая школа, 1985.
5. <http://www.gks.ru> - официальный сайт Федеральной службы государственной статистики Российской Федерации.

УДК 621.86/87

3D-ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

Елена Ильинична Королева

*Студентка 4 курса,
кафедра «Системы автоматизированного проектирования»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Д.Ю. Сафин,
ассистент кафедры «Промышленный дизайн»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Роботы проектируются, конструируются и производятся в самых разных странах. Для кого-то роботы – потребность, для других – специальность, для кого-то роботы – просто хобби.

Британская ассоциация по робототехнике дает следующее определение робота: "перепрограммируемое устройство, предназначенное для манипулирования и транспортировки деталей, инструментов или специализированной технологической оснастки посредством переменных программируемых движений по выполнению конкретных производственных задач". Проще говоря, робот – это автоматическое устройство, предназначенное для осуществления производственных и других операций, обычно выполняемых человеком.

В настоящее время существует огромное количество разных типов и видов роботов, среди них: мобильные и стационарные, промышленные и бытовые, миниатюрные, сверхминиатюрные (для нанотехнологий) и гигантские, боевые и специальные, медицинские и пожарные, беспилотные летательные аппараты и многие другие. Остановимся на промышленных роботах.

Промышленные роботы находят широкое применение в научных исследованиях и промышленном производстве. Под понятием промышленный робот подразумевается автоматический программно-управляемый манипулятор, выполняющий рабочие операции со сложными пространственными перемещениями. Рассмотрим наиболее распространенные виды промышленных роботов:

- Сварочные роботы (рис. 1)

Сварка - наиболее часто используемая технологическая операция, нуждающаяся в автоматизации. Применение промышленных роботов в несколько раз уменьшает затраты на подготовку и переоснастку производства для создания качественного сварного соединения и значительно сокращает риск возникновения профессиональных

заболеваний у персонала. Благодаря сварочным роботам можно достичь высокого уровня производительности и качества выпускаемой продукции.

- Роботы для плазменной резки(рис. 2)

Метод основан на разделении материалов с помощью струи, температура которой достигает 20000°C , что позволяет добиться достаточно высокой скорости резки - до $0,4$ м/с.

Роботизированная резка применяется в судостроении, крупном машиностроении и в других отраслях промышленности, связанных с объемными конструкциями. По сравнению с ручной работой, роботы способны регулировать напряжение, обеспечивая тем самым заданную длину дуги и, следовательно, достижение высокого качества реза.



Рис. 1. Сварка на конвейере Hyundai Solyaris



Рис. 2. Плазменная резка металла

В современной промышленности роботы для плазменной резки могут решить множество задач, связанных с изготовлением полуфабрикатов и готовых изделий – сложных, объемных металлоконструкций.

- Роботы для дуговой сварки (рис. 3)

Дуговая сварка является одной из самых востребованных технологий в мире.

Тот факт, что производительность и качество роботизированной дуговой сварки во много раз превосходят характеристики человеческого труда, является неоспоримым. Современные роботы для дуговой сварки способны выполнять следующие функции: коррекцию сварки в реальном времени, предварительный и финальный контроль качества сварочных швов, контроль процесса заполнения шва, многоточечное позиционирование, автоматическую калибровку электрода и многие другие

- Роботы для контактной (точечной) сварки (рис. 4)

Роботизированная точечная сварка обладает хорошей эффективностью, во много раз экономически выгоднее, чем человеческий труд, а производительность при этом намного выше. В технологическом процессе точечной сварки не требуются специальные материалы (флюсы, газы), необходимые для дуговой сварки. И сварка, и перемещение выполняются одним роботом. Высокой производительности соответствует столь же высокий и стабильный уровень качества сварки.



Рис. 3. Применение роботов в дуговой сварке



Рис. 4. Точечная сварка металла



Рис. 5. Роботизированное паллетирование

- Роботы для паллетирования (рис. 5)

Необходимость автоматизации паллетирования продукции обусловлена использованием поддонов для укладки, потребностью в сокращении временных потерь, стремлением удалить человека из опасной рабочей среды.

Главная отличительная черта роботизированного паллетирования – это абсолютная универсальность, которая решена за счет применения промышленного робота с 6-ю осями подвижности.

С развитием промышленной робототехники, у технологии роботизированного паллетирования практически нет слабых мест, поскольку уже сегодня существуют роботы грузоподъемностью более 1-ой тонны, а увеличение зонной досягаемости, решается применением дополнительного модуля перемещения, который является 7-ой осью робота.

Современные средства 3D визуализации становятся всё более функциональными, они позволяют реализовать любые задумки дизайнера. Всё чаще мы видим детально проработанные 3D иллюстрации, которые выглядят очень реалистично. Особенно реалистично выглядят металлически поверхности, поэтому не удивительно, что иллюстрации роботов, созданных при помощи современных средств визуализации, кажутся нам настоящими.

Благодаря таким известным программным пакетам как Technomatix, его приложению Robcad, а также другим промышленным САПР: Catia, NX, Pro/Engineer, RobotStudio, AutoCAD, стала возможной разработка, симуляция, анализ, оптимизация, off-line программирование роботизированных и автоматизированных технологических процессов.

3D визуализация обеспечивает решение различных производственных задач, в числе которых:

- производство деталей
- планирование и проверка сборки
- имитационное моделирование и оптимизация систем и бизнес-процессов
- управление качеством и геометрической точностью
- управление производственным процессом
- моделирование роботизированных техпроцессов промышленных роботов
- соответствие требованиям эргономики
- обеспечение технологичности
- повышение производительности
- сокращение сроков подготовки производства

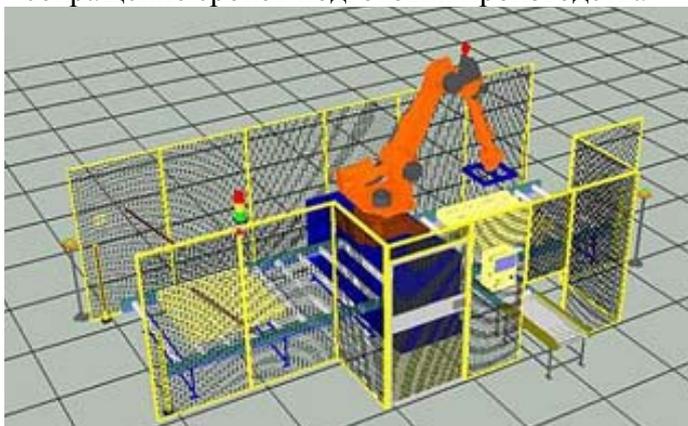


Рис. 6. Симуляция
роботизированного процесса
паллетирования в среде
AX On Desk

Пакеты решений для трехмерного моделирования, анализа и автоматизированной подготовки производства позиционируются на рынке как решения для устранения разрыва между автоматизацией проектирования и непосредственным изготовлением изделия. При этом производится проектирование техпроцессов и их выполнение на основе ассоциативной модели данных. Определение оптимальных способов производства, учет технологических особенностей с этапа проектирования изделий, моделирование реальных технологических процессов в виртуальной среде – все это становится реальным, благодаря роботизированным САПР.

Некоторые программы моделирования и промышленного дизайна роботов, такие как AX On Desk, можно использовать даже на ноутбуке или персональном компьютере. AX On Desk имитирует все элементы робота паллетирования (рис. 6), а также обеспечивает создание точной и реалистичной работы компонентов робота в 3D-среде, обнаружение диагностических проблем и технических сбоев. Файлы, созданные в данном продукте можно легко импортировать в центр управления роботом, что заметно упрощает процесс создания роботизированного комплекса.

В последнее время становится популярным использование VRML (the Virtual Reality Modeling Language - язык моделирования виртуальной реальности) на WWW (World Wide Web), для моделирования операций промышленных роботов. Функциональные роботизированные системы могут быть смоделированы с помощью скриптов VRML. Это открывает путь для будущего веб-среде, где роботы (или других

функциональные машины) можно загрузить с веб-сайта поставщика и поместить в виртуальную модель завода. Загруженные модели оборудования полностью функциональны и позволяют произвести моделирование производственного процесса до того, как роботы приобретаются и устанавливаются непосредственно на заводе. Это помогает убедиться, что дорогостоящее оборудование работает с максимальной эффективностью и производительностью.

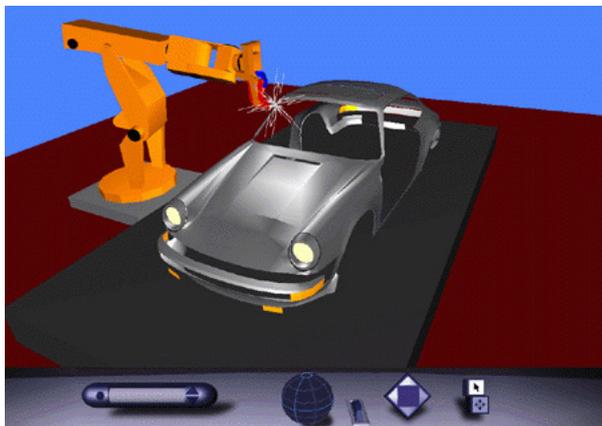


Рис. 7. Робот для точечной сварки



Рис. 8. Industrial Robot Arm
(Рука промышленного робота)

Данный робот демонстрирует выполнение задачи точечной сварки. При нажатии на серый постамент робота начинаются сварочные работы. Нажатие на любую из ссылок приводит сварочного робота в запрограммированное движение.

Для детального проектирования роботов иногда используются программы промышленного дизайна, такие как 3ds Max, Adobe Technical Suite и многие другие. Полученные модели с высоким разрешением подходят для использования крупным планом в рекламных роликах, фильмах, дизайн-визуализации, анимации и так далее.

Эта модель промышленного робота для контактной сварки спроектирована в среде 3ds Max 9.0 (рис. 7).

Она состоит из 545 объектов, собранных в одну группу. Презентация продукта предусматривает анимацию. Трехмерная форма, приведенная в действие, позволяет определить границы траектории движения и охвата программируемого роботоманипулятора.

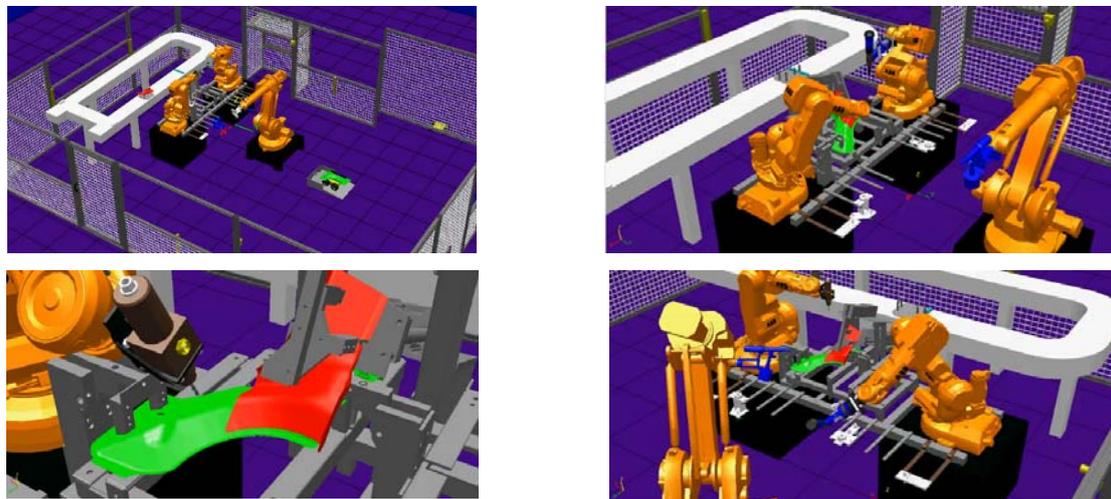


Рис. 9. Использование 3D-моделирования для проверки программ управления

Каждая ось или узел (сустав робота) является степенью свободы, их количество определяется числом независимых траекторий, по которым манипулятор способен двигаться. Промышленные роботы, как правило, имеют 5 или 6 степеней свободы, 3 из которых позволяют позиционировать модель в трехмерном пространстве, а остальные используются для ориентации исполнительных органов роботов, выполняющих рыскание, крен относительно поперечной оси, вращение вокруг продольной оси и многие другие.

Цель проиллюстрированного проекта - показать, как 3D-моделирование может быть использовано в робототехнике для проверки и совершенствования программ управления производственного модуля, и исследовать преимущества и недостатки данного метода разработки. Проект включает в себя создание виртуальной 3D-модели реального производственного модуля и средства разработки и тестирования программного управления модулем (рис. 9). Производственный модуль состоит из трех промышленных роботов, двух AGV (Autonomous Guided Vehicle – автономное управляемое средство) и одного конвейера. В производственном модуле с помощью заклепок соединяются две части металлической конструкции. Один робот сверлит отверстия, а два других вводят заклепки в сборку. Автономные управляемые средства и конвейер используются для транспортировки металлических частей до прохождения процесса сборки промышленными роботами и впоследствии собранных конструкций. Данный метод 3D-моделирования позволяет использовать в виртуальной трехмерной модели те же управляющие программы и команды, что и в реальном производстве.

Рассмотренные принципы 3D-визуализации промышленных роботов являются основными среди огромного количества методов и способов проектирования трехмерных моделей производственных модулей, манипуляторов и многих других робототехнических систем, позволяющих улучшить качество продукции, сократить продолжительность и стоимость операций, выполнить работу, приносящую вред человеческому здоровью.

Литература

1. *Козырев Ю. Г.* Промышленные роботы: Справочник. – М.: Машиностроение, 1988. – 392с.
2. *В.И. Захарова и М.П. Васильева* Промышленные роботы. - М.: 1992 – 286 с.

УДК 629.361

ВОЗМОЖНОСТИ ДИЗАЙНА В ОРГАНИЗАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВА МОБИЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Илья Владимирович Селиванов

*Студент 6 курса,
кафедра «Промышленный дизайн»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: М.А. Синельников,
старший преподаватель кафедры «Промышленный дизайн»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Аномальная жара лета 2010 года спровоцировала невероятное количество пожаров на территории всей Центральной России. Множество крупных городов заволокло смогом от горящих лесов и торфяников. И столичный регион не стал исключением. На протяжении многих недель Москва была затянута дымом, и порой его плотность была, как при разгоне демонстраций.

Известно, что тушение лесных и торфяных пожаров сопровождается рядом дополнительных сложностей:

1. Труднодоступность очага
2. Отсутствие поблизости источника воды большой емкости
3. Непредсказуемость поведения огня на открытой местности

На данный момент наиболее эффективным является использование авиатехники для тушения такого рода пожаров. Однако наряду с высокой эффективностью этот способ обладает и высокой стоимостью. Указанные условия подтолкнули специалистов кафедры «Промышленный дизайн» к идее проектирования машины повышенной проходимости и обладающей большой грузоподъемностью для тушения природных пожаров.

Параллельно с этим от фирмы «Аква-Пиро-Альянс» на кафедру МТ-4 поступило предложение на проектирование пожарного автомобиля, использующего иной способ тушения. В этой технологии основным пламегасящим веществом также является вода, но определенным образом подготовленная. Для этого ее под большим давлением (от 130 до 200 атм) нагревают до температуры 160...210 °С. При последующем выбросе воды в таком состоянии в атмосферу из пожарного ствола специальной конструкции образуется чрезвычайно плотный туман из мелкодисперсных капель диаметром 1...5 микрон, гораздо меньших капель природного тумана. Такая вода называется термически активированная (ТАВ). Борьба с огнем струями ТАВ обладает гораздо большей эффективностью по сравнению с обычными методами тушения – 3 куб. м воды хватает на 45...50 минут работы, и при этом плотное облако вытесняет кислород, сбивая пламя и способствуя самоугасанию очагов, включая

скрытые. Эта технология разрабатывается уже с начала 90х годов, но созданные автомобили на ее базе все еще далеки от совершенства.

Очевидно, что объединение новой технологии пожаротушения с автомобильной базой повышенной проходимости представлялось весьма перспективным, потому было принято решение дальнейшую разработку вести в данном ключе.

На этапе дизайн-анализа был проведен опрос пожарных на тему имеющихся недостатков существующей машины. В процессе интервьюирования было выяснено, что тушение струями ТАВ чрезвычайно эффективно в городской черте, но недостаточно подходит для борьбы с лесными и торфяными пожарами. В связи с этим было принято решение акцентировать внимание на доработке, а по факту – на серьезной переделке существующего автомобиля.

Имеющаяся компоновка оборудования в кузове была проработана недостаточно тщательно, что усложняло и без того непростой процесс эксплуатации машины, вынуждая боевой расчет совершать множество ненужных действий, увеличивая количество времени на подготовку к тушению. Для экстренной службы, от которой зависят жизни людей, трата времени впустую – непозволительная роскошь.

Представлены возможные варианты перемещения членов боевого расчета для подготовки системы к работе (рис. 1).

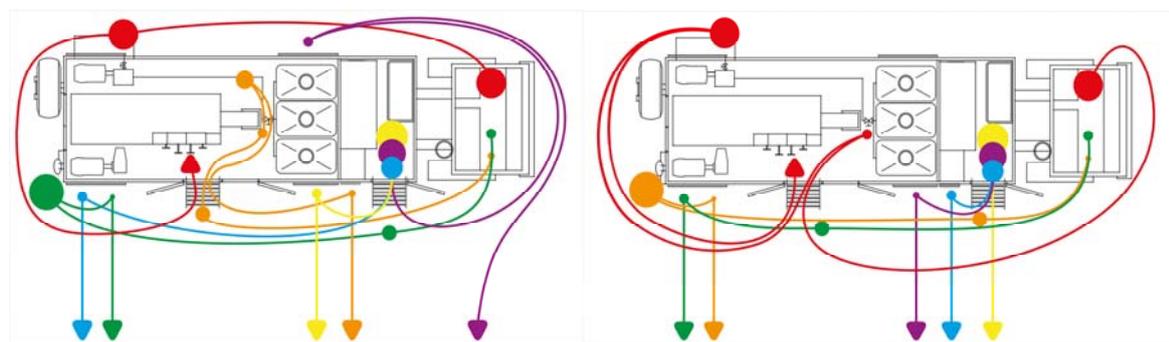


Рис.1. Схема перемещения членов боевого расчета при использовании исходного автомобиля

Как видно из общих схем, перемещений приходится совершать немало. Помимо этого, водитель/оператор следит за режимом работы системы в крайне стесненных условиях, что не может не сказаться на качестве выполнения его функций.

В результате полного дизайн-анализа был очерчен весьма обширный круг проблем, которые необходимо решить, прежде чем можно было бы ставить автомобиль на дежурство в пожарные части, не боясь гневных отзывов использующих его пожарных. Также нужно было сохранить удачные компоновочные решения и не нарушить рассчитанный баланс системы.

В процессе дизайн-проектирования было предложено много различных вариантов компоновки имеющегося оборудования, избавляющих от тех или иных недостатков, однако, наиболее оптимальным стало решение, при котором три стандартные покупные пластиковые емкости для воды заменялись на одну специальной конструкции. Эта простая идея стала фундаментом проекта и позволила в дальнейшем решить все поставленные задачи.

Итоговым результатом работы стала новая компоновка, удовлетворяющая всем требованиям, выдвинутым на этапе дизайн-анализа.

Схема перемещений членов расчета при измененной компоновке (рис. 2).

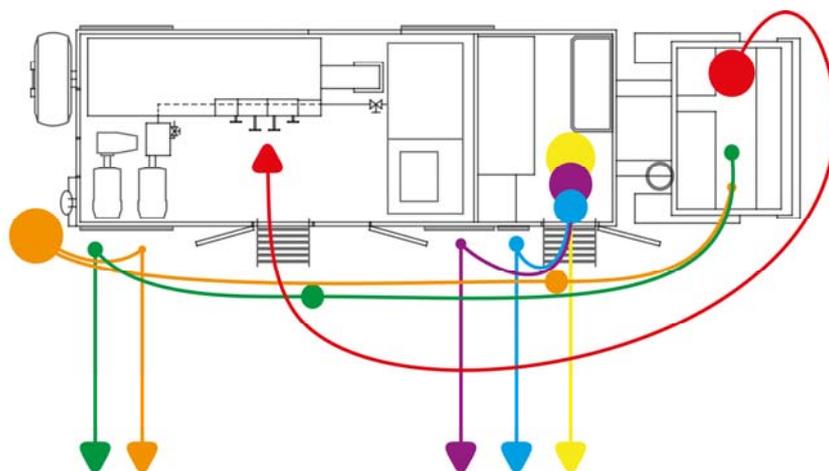


Рис. 2. Схема перемещения членов боевого расчета при использовании перепроектированного автомобиля

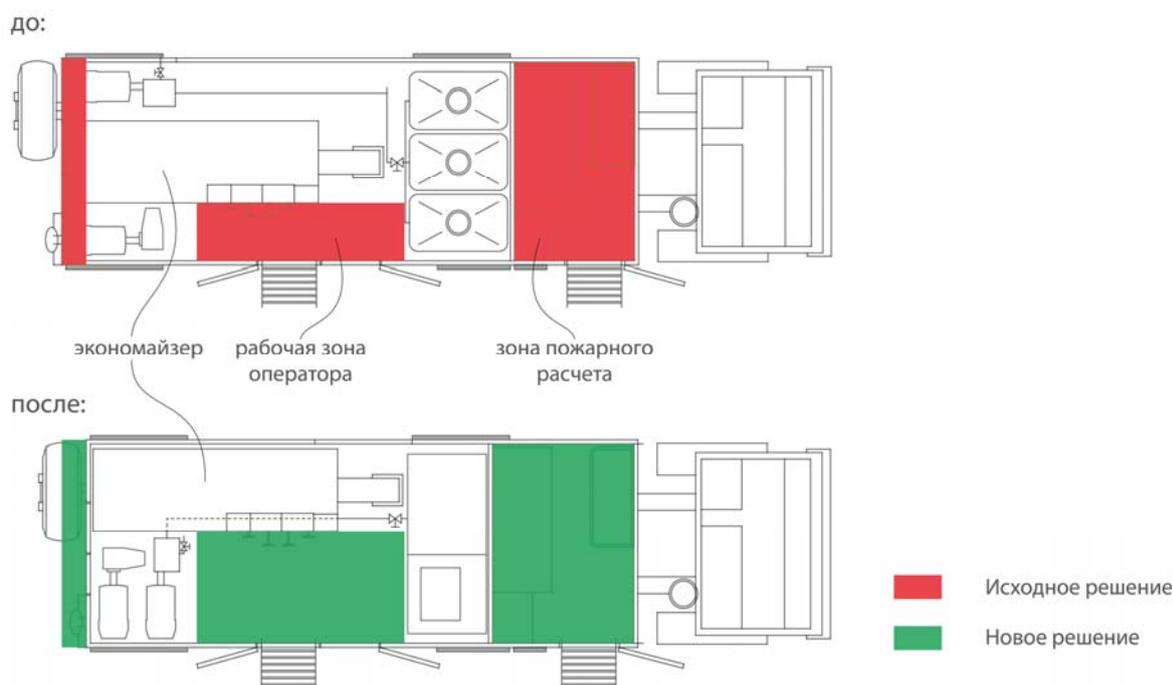


Рис. 3. Схема внесенных изменений

Экономия времени на разворачивании позволит спасти не одну жизнь, а работать со спроектированной с учетом эргономики системой гораздо удобней.

Как видно из иллюстраций (рис. 3), перемещение экономайзера дало много места для оператора. Спроектированная емкость более органично и компактно вписывается в КУНГ. Наклонное дно позволяет полностью слить воду, отсутствуют проблемы с наполнением через гидрант.

При такой компоновке центробежный насос находится возле зоны работы оператора, в связи с этим для запуска установки нет необходимости выходить из КУНГа, что позволяет ускорить процесс запуска системы.

Новая емкость позволила увеличить на 300 мм транспортно-пассажирский отсек, в котором теперь стало гораздо просторней.

Специальный стеллаж позволяет упорядочить хранение имеющегося в изобилии дополнительного оборудования.

Новая компоновка (рис. 4) предоставляет еще целый ряд преимуществ, помимо указанных выше. Таким образом, дизайн-проект пожарной машины позволил создать автомобиль более удобный для решения тех задач, которые на него могут быть возложены во время боевого дежурства.

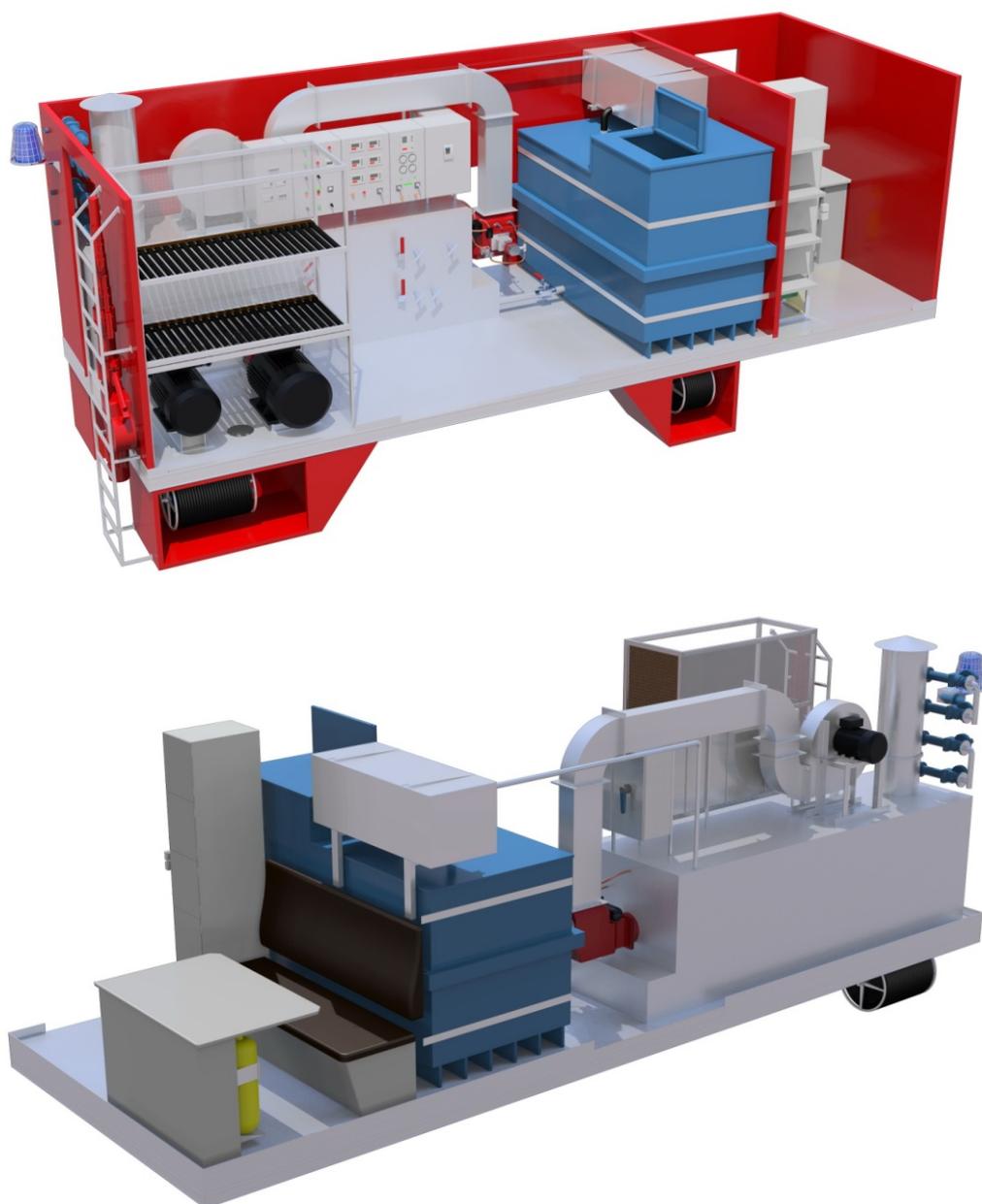


Рис. 4. Новая компоновка пожарного автомобиля

УДК 331.101.1

Дарья Дмитриевна Спасская

*Студентка 3 курса,
кафедра «Системы обработки информации и управления»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научные руководители: Н.Ю. Терехова⁽¹⁾, Б.С. Горячкин⁽²⁾,
доцент кафедры «Промышленный дизайн»⁽¹⁾, кандидат технических наук, доцент
кафедры «Системы обработки информации и управления»⁽²⁾,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Понятие «эргодизайн» является сложным, состоящим из двух понятий: «эргономика» и «дизайн», которые часто воспринимаются и существуют независимо друг от друга. Определений этих понятий достаточно множество, они существуют и используются в зависимости от области их применения и назначения.

Эргономика – наука, комплексно изучающая закономерности взаимодействия человека с техническими средствами, предметом деятельности и средой. Человек, техника и среда рассматривается в эргономике как сложное функциональное целое, в котором ведущая роль принадлежит человеку. При проектировании такой сложной системы «человек-техника-среда», уделяется серьезное внимание всем ее компонентам, а не только техническим средствам, которые на стадии их простой практической «подгонки» к человеку становятся значимыми компонентами этой системы. Разработка и оценка проектных решений по созданию удобной, надежной и безопасной техники и рабочих мест выделены в специальную область - эргономическое проектирование системы «человек-техника-среда». Это проектирование направлено на обеспечение заданных эргономических свойств системы, способствующей повышению работоспособности людей. В настоящее время существует ряд научных и технических разработок по расчету оптимальной рабочей нагрузки на организм человека, которые позволяют проектировать его трудовую деятельность, исходя из принципов комфортности и повышения качества труда человека.

Дизайн - это современное, модное и широкоупотребляемое понятие. Дизайн подразделяют на истинный дизайн, функционализм, стилизацию и стайлинг. Истинный дизайн - создание изделий на основе технических требований, передовых основ эргономики, системного, функционального и композиционного анализа, а форма изделия в этом случае наиболее точно отображает его практическое назначение. Функционализм - формообразование изделия на основе совершенствования его функций, стилизация - конструирование внешнего вида нового изделия по существующему образцу, а стайлинг- конструирование изделий отличающихся от своих аналогов лишь внешним видом.

Соединением вышеперечисленных понятий и знаний стал эргодизайн.

Целью эргодизайна рабочего места руководителя является повышение эффективности деятельности при сохранении здоровья и всестороннем развитии личности.

Проектирование рабочего места современного руководителя достаточно трудоемко и затратно, так как должно производиться индивидуально. В условиях бурного развития и появления новой техники деятельность руководителя становится все более сложной и напряженной. По данным статистики, надежность выполнения

человеком все более усложняющихся функций уменьшается, поэтому увеличение надежности технической составляющей сложной системы теряет смысл, так как надежность всей этой системы лимитируется также надежностью самого человека.

Проектирование такой сложной системы проходит совместными усилиями деятельности специалистов разного профиля. Сегодня к проектированию рабочих мест привлекаются не только специалисты, занимающиеся изучением человека и его деятельности, но и проектировщики, эргономисты и дизайнеры, владеющие необходимыми методами, средствами, практическими навыкам.

Основная задача при проектировании рабочего места руководителя и оптимизации этой сложной системы - обеспечение эргономических требований к конструированию, оснащению и планировке рабочего пространства, поиске оптимального сочетания возможностей техники и человека в комфортной рабочей среде.

Как бы ни была совершенна техника, ее эффективное и безопасное применение в конечном итоге зависит от того, насколько полно согласованы конструктивные параметры с оптимальными условиями работы человека, с его психофизиологическими возможностями и особенностями. Поэтому и возникает необходимость изучения работы сложной системы в едином комплексе «человек-техника-среда».

Для ликвидации предпосылок «травмирования» составляющие всей системы, ее согласовывают по осязательным, обонятельным и вкусовым индивидуальным привязанностям, а также психофизиологическим и психологическим особенностям человека. Оптимальные условия работы обеспечиваются соответствием технического оборудования и рабочей среды. Оптимальность предполагает высокопроизводительный труд при устойчивой работоспособности человека и сохранении его сил и здоровья.

Для того, чтобы разработать эргономичное рабочее место руководителя необходимо знать входные и выходные параметры его деятельности. К входным параметрам относится вся первичная информация, поступающая к руководителю из разных источников и различными способами связи. Как правило, информация бывает избыточной и неупорядоченной. К выходным параметрам можно отнести результат деятельности руководителя.

Имея данные параметры, а также подробное описание выполняемых руководителем функций и действий в течении рабочего дня (месяца, года) можно разработать эргономичное рабочее место с необходимыми и достаточными техническими средствами. Хороший результат может быть достигнут в том случае, если имеется соответствие между входными и выходными параметрами.

Для исследования была взята информация из 10 школ Москвы и Московской области, а также 10 школ регионов. При, казалось бы, небольшой выборке, был сделан ряд выводов, что количеством исследуемых 15-20 кабинетов руководителей можно ограничиться, т.к. была выявлена общая схожесть их деятельности и оснащенности кабинетов на настоящий момент.

На представленных фотографиях представлены рабочие места руководителей школ, компаний и предприятий.

На фотографиях представлены рабочие места руководителей школ, компаний и предприятий (рис. 1-5).



Рис. 1. Рабочее место руководителя 1



Рис. 2. Рабочее место руководителя 2

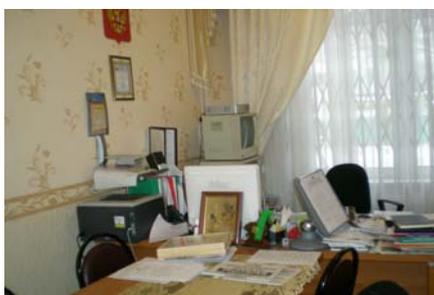


Рис. 3. Рабочее место руководителя 3



Рис. 4. Рабочее место руководителя 4



Рис. 5. Рабочее место руководителя 5

Руководители школ выполняют и принимают порядка 250 различных важных действий и решений от которых зависит работоспособность всей сложной системы. Директор школы – юридически ответственное лицо, отвечающее за жизнь и здоровье детей и сотрудников. Он отвечает за учебно - воспитательный процесс, подбор кадров, материально- техническое оснащение образовательного учреждения, климат в коллективе, материальное положение сотрудников, качество обучения. Осуществляет разработку перспективного планирование работы школы на 3-5 лет, текущее планирование на четверть или триместр, проводит расчет учебной нагрузки. Готовит порядка 100 отчетов за год (отчеты по учебно- воспитательной работе, внеклассной работе, «второй половине рабочего дня», количеству кружков, факультативов, контингенту учеников, количеству и планам выпускников). Руководитель отвечает за получение документов строгой отчетности (аттестаты, медали).

В рамках административной работы осуществляет подготовку к аттестации и лицензированию школы, участвует в совещаниях в департаменте образования и других

административных структурах, ведет работу с общественными организациями, возглавляет участковую избирательную комиссию. Хозяйственная деятельность тоже лежит на плечах руководителя. Он решает множество хозяйственных задач от проведения конкурса по закупке бумаги и ручек до проведения сети Internet и ремонта помещений школы, который проводится каждый год в каникулярное время (плановое и внеплановое). Важными является и работа с родительским комитетом, проведение собрания с родителями, работа с трудными детьми, работа с участковым, наркологом. Работа с учителями - это и личные вопросы, и служебные вопросы, и организация курсов повышения квалификации для подтверждения их категории (144 часа в год). Решение вопросов по оценкам «неудовлетворительно» в четверти, подготовка к ЕГЭ, организация олимпиад, конкурсов, поездка в музеи и питание детей также лежит на руководителе - директоре школы.

У руководителя есть заместители по административной, хозяйственной воспитательной и учебной работе, причем качество и скорость взаимодействия с ними приводит к увеличению или уменьшению качества работы всей сложной системы в целом. Причем, без современных технических систем и средств связи решить ни один вопрос быстро и качественно не получается. Именно поэтому, руководители никогда, как показали наши исследования, не находятся в своем кабинете более 40 минут, а их рабочий телефон не замолкает ни на минуту. Замена рабочего телефона на доступный для всех номер мобильного аппарата, который всегда находится с руководителем, приведет к физической перегрузке. И если руководитель не сделает себе принудительный, пятнадцатиминутный перерыв, то не сможет провести весь рабочий день в состоянии хорошей работоспособности, а все всплывающие вопросы и проблемы, будут решены не качественно или вообще не решены.

Трудовая деятельность руководителя будет успешной и физически безопасной и во многом зависит не только от согласованности действий людей в коллективе, но и определяется условиями организации рабочего пространства и его рабочего места.

Современное рабочее место руководителя, который работает при сильном воздействии на него информационного шкала, должно отвечать требованиями безопасности труда, быть удобным, соответствовать антропометрическим, физиологическим и психологическим требованиям. Организация и проектирование современного рабочего места руководителя с учетом всех эргономических критериев и дизайна весьма трудоемкий процесс. Каждый человек неповторим, люди различаются ростом, комплекцией, осанкой, размерами частей тела. У каждого есть свои требования и привязанности, да к цветовому решению помещений подходят очень щепетильно. В школах большинство помещений всегда были выкрашены в оттенки зеленого, так как существовало мнение, что этот цвет успокаивает. Оказалось, что современные руководители предпочитают далеко не зеленые цвета. Наш опрос показал, что предпочтение отдается холодным бледно – желтым оттенкам и различным градациям серого цвета. Можно отметить, что желтый цвет символизирует спокойствие, непринужденность и интеллигентность, а серый – рассудительность, что вполне подходит для цветового решения помещений руководителей этого звена. В настоящее время существует ряд хороших колористических решений, которые разрабатываются непосредственно под личность руководителя и отвечают всем требованиям современного дизайна помещений. Есть так же важные факторы при формировании эргономического места такие как: площадь рабочего места составляла не менее 6 квадратных метров, а объем - 24 кубических метров. Для внутренней отделке помещения должны использоваться диффузно-отражающие материалы с коэффициентом отражения для потолка - 0,7-0,8; для стен - 0,5-0,6; для пола - 0,3-0,5. Конструкция рабочего стула (кресла) должна обеспечивать поддержание рациональной

рабочей позы при работе с ПЭВМ, позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления работающего. При компоновке рабочего места необходимо учитывать увеличение размеров тела, связанное с одеждой.

При анализе и оценке рабочего места руководителя, ознакомления с условиями его труда, можно сделать следующие выводы. Все рассмотренные помещения - кабинеты руководителей удовлетворяют санитарно-гигиеническим и социально-психологическим требованиям, но необходимо искать пути повышения эстетической составляющей этих требований путем улучшения интерьеров и создания функционального, психологического и бытового комфорта.

Количество технических средств должно быть сбалансировано. Например, нет необходимости размещать в одном кабинете три телефона и факс, так как невозможно сразу разговаривать с четырьмя абонентами, тем более принимать одновременно четыре серьезных решения. Достаточно одного телефона с несколькими линиями, а факс может быть передан одному из заместителей. Копировальные аппараты, которые тоже находятся на территории исследуемых помещений, должны быть вынесены за их пределы, т.к. другие сотрудники легко могут выполнить функцию копирования документов.

В исследуемых помещениях руководителей наблюдается множество бытовых, чайных и столовых приборов. Если они присутствуют во всех исследуемых помещениях, следовательно, они являются часто используемыми и нужными вещами.

В данном случае, эти предметы являются посторонними и не должны находиться в деловой зоне руководителя. Следует выделить специальную зону отдыха, которая находится вне зоны визуального доступа сотрудников и детей.

Рассматриваемая сложная система на примере организации деятельности руководителя является динамической, целеустремленной, самоорганизующейся и адаптивной. Исследование структуры системы, ее компонентов, характера межкомпонентных связей и связей системы с внешней средой в динамике и развитии позволяет спроектировать рабочее место руководителя с учетом всех современных требований эргономики.

Литература

1. Металлорежущие станки и автоматы М.:Машиностроение, под редакцией А.С. Проников, 1981 год
2. Даниляк А.И.. Лекции по промышленному дизайну. Часть Эргономика, - М.:, - 2011.
3. Сергеев С.Ф. Инженерная психология и эргономика: Учебное пособие. - М.: НИИ школьных технологий, 2008. – 176 с.

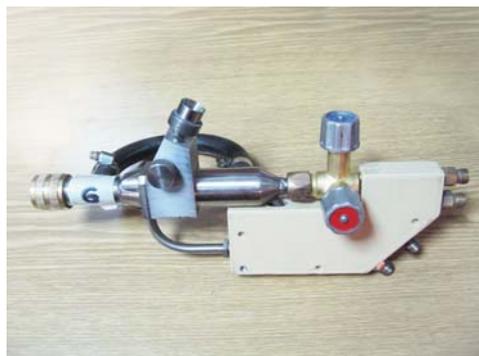
УСТАНОВКА ДЛЯ СВЕРХЗВУКОВОГО ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ JETSPRAY

Андрей Александрович Яшин

*Студент 6 курса,
кафедра «Промышленный дизайн»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

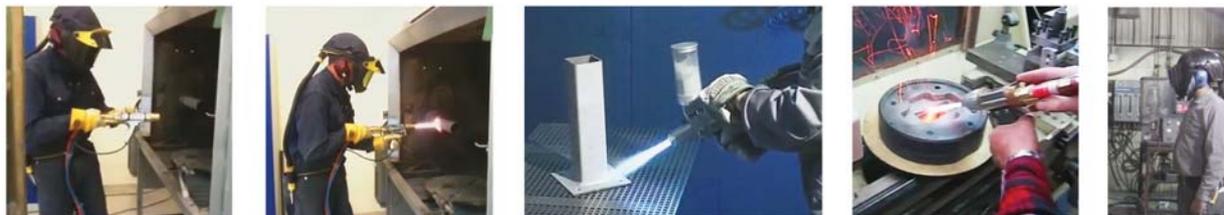
*Научные руководители: М.А. Синельников, М.М. Михеева,
старшие преподаватели кафедры «Промышленный дизайн»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Инженерная разработка установки газопламенного напыления велась на кафедре «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э.Баумана. Коллективом кафедры был создан рабочий образец установки, который успел завоевать несколько медалей на международных выставках по технологии, но проигрывал по внешним и эргономическим показателям. Цель дизайн-проектирования – вывести продукт на конкурентоспособный рынок. Её основные задачи – обеспечить ручное использование установки, которое не было предусмотрено, и комфортные условия работы.



Рабочий образец установки СГН

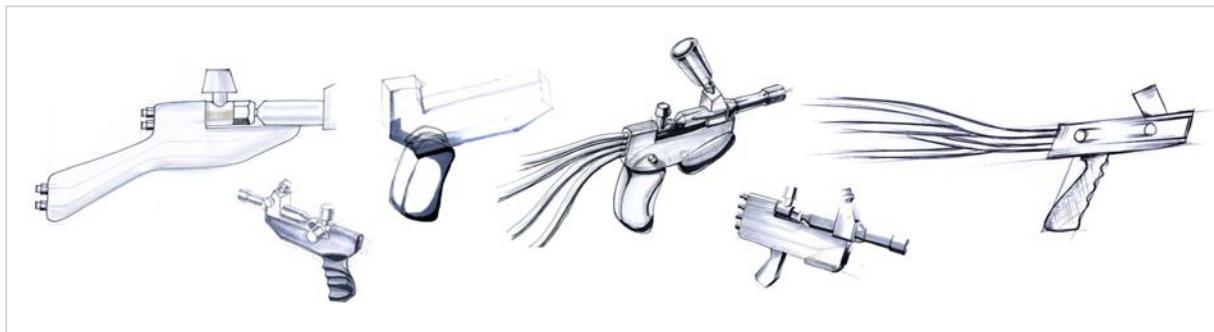
Было рассмотрено и изучено множество реальных испытаний, на которых рабочий, используя различные ручные установки, напылял металлическую поверхность. Можно было выявить все недочеты при работе с такой установкой и не допустить их при разработке ручной модификации Jet Spray.



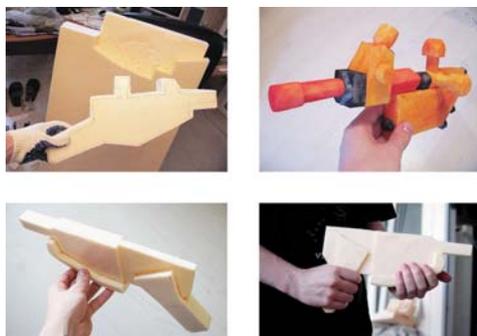
Разные этапы и сценарии использования установки ручного напыления поверхностей

По мере решения поставленных задач были проведены следующие этапы разработки: изучение опытного образца, интервью с разработчиками, анализ существующих аналогов, концептуальное проектирование, поисковое эскизирование, проработка концепции, эргономические требования, проработка технологической части, оформление подачи проекта.

В процессе поиска формы был отрисован ряд эскизов и скетчей.

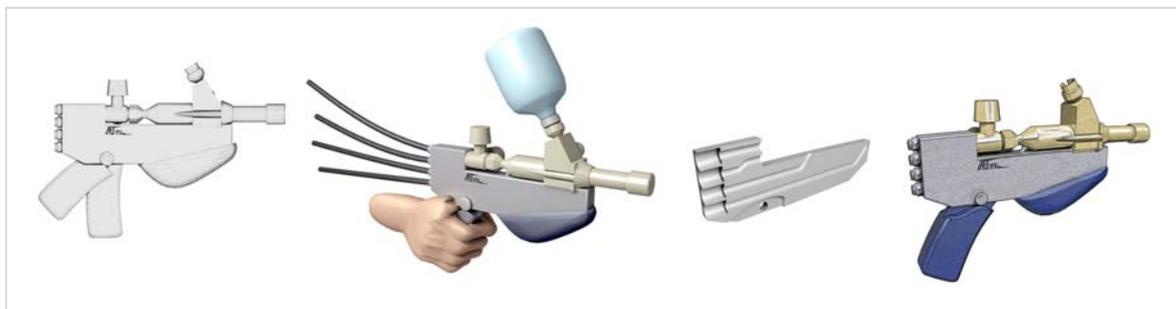


Варианты решений поставленных задач отрабатывались на нескольких поисковых макетах, с помощью которых была найдена оптимальная версия. Была предложена рукоятка, которая может вращаться относительно точки крепления на 48 градусов, а также накладка из плотной ребристой резины, которая помогает обеспечить высокую точность направления установки и повысить безопасность ее использования.



Поисковые макеты

Лёгкий алюминиевый корпус предполагается изготавливать из двух симметричных половинок, которые фрезеруются на станке с ЧПУ.



Дизайнерское решение принималось на основе проведенных исследований. На стадии зарождения концепта и эскизирования были исключены менее выигрышные варианты дизайна. При проектировании ручной установки сверхзвукового газопламенного напыления покрытий было учтено большинство потребностей пользователей, что говорит о человекоориентированном подходе к проекту и глубокой проработке изделия в целом.

Секция №10
Оборудование и технологии прокатки

УДК 621.771

ЛИТЕЙНО-ПРОКАТНЫЙ АГРЕГАТ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ШИРОКОПОЛОСНОЙ СТАЛИ

Иван Игоревич Лубнин

*Студент 3 курса,
кафедра «Оборудование и технологии прокатки»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Г.С. Никитин,
доктор технических наук, профессор кафедры «Оборудование и технологии
прокатки»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

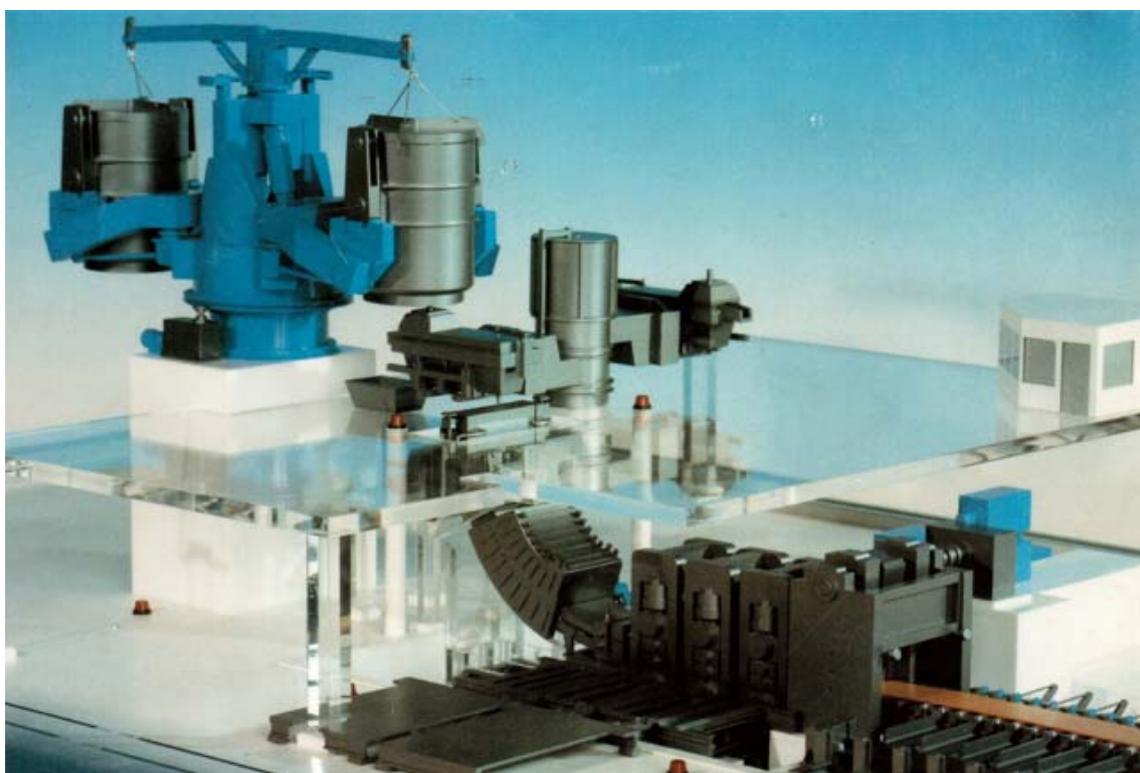


Рис. 1. Фрагмент макета литейно-прокатного агрегата по технологии ISP

С 1987 по 1989гг. Mannesmann Demag провела испытания по литью плоской заготовки на модифицированном литейном агрегате с двумя ёмкостями для разлива в отделении Mannesmann Steelworks, Дуйсбург, Германия. В результате, новая технология прокатки слитка в сочетании с хорошо зарекомендовавшим себя методом непрерывного литья позволяет получать продукцию необходимого качества. На МНЛЗ производится слиток толщиной минимум 15 мм или слиток, который может быть прокатан с относительно небольшими затратами на стане.

Свойства материалов, полученных при прокатке литьём тонких полос (слябов) такие же, как полученные традиционной прокаткой. Слитки имеют хорошее качество и являются продуктом для продажи с диапазоном толщины 1035 мм. Более тонкая полоса получается на прокатном стане.

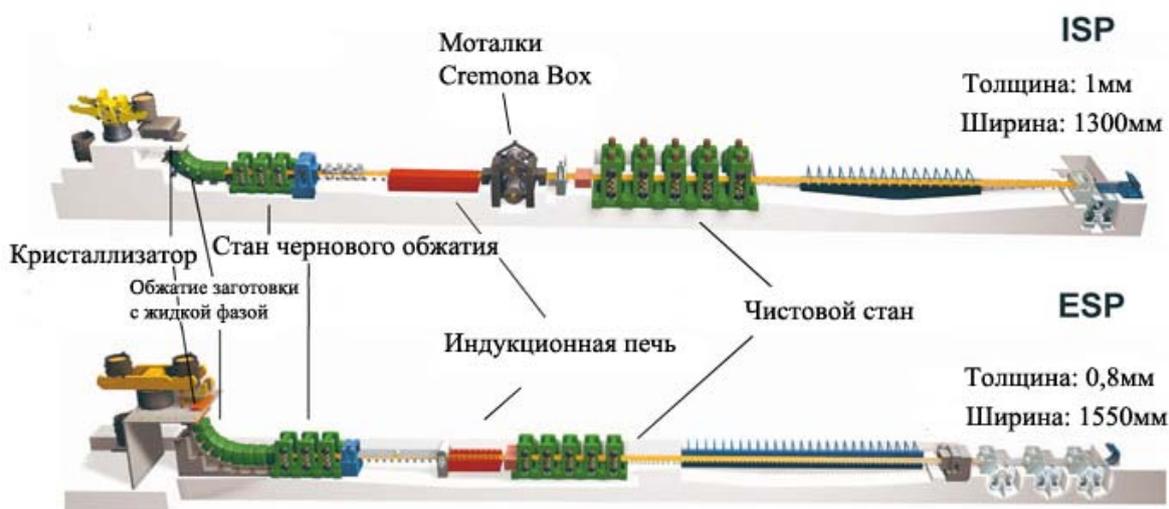


Рис. 2. Компоновочная схема при процессах ISP и ESP

Линия для получения тонких полос непрерывным литьём и прокаткой разработана итальянской компанией Finarvedi. Чтобы связать две стадии процесса, агрегат имеет печь с моталкой и линию чистовых клетей кварто.

При производстве горячей полосы используют технологию непрерывного литья и последующее уменьшение толщины в нескольких группах клетей. Этот процесс назван ISP – Inline Strip Production (или поточное производство полосового проката), и развит совместно фирмами Mannesmann Demag и Arvedi. Данный агрегат сконструирован для производительности 500 тыс. тонн в год из которых 200 тыс. полос из нержавеющей стали.

На одноручевой МНЛЗ производятся тонкие слябы шириной 650...1330 мм. Толщина сляба в кристаллизаторе: 60 мм и минимум 15 мм на выходе из последней пары валков машины. Длина сляба зависит от массы рулона (20 кг/мм). Максимальная скорость литья в кристаллизаторе – 6 м/мин и 16 м/мин на выходе из последней пары валков литейной машины. В чистовой группе производится горячая полоса толщиной от 1,7 до 12 мм в зависимости от марки стали, толщины и ширины сляба.

Процесс ESP, указанный на рис. 2, является продолжением концепции ISP и расшифровывается как Endless Strip Production, что означает производство бесконечной полосы. В данном случае не требуется промежуточный подогрев полосы и промежуточная смотка полосы перед чистовой группой клетей, число которых варьируется в зависимости от требуемой выходной толщины проката.

Табл. 1. Основные технические данные

Толщина сляба, мм	<60 (в процессе); 15...25 (в намотке);
Ширина сляба, мм	650...1330мм
Масса рулона, кг	макс. 26.600
Удельная масса рулона, кг/мм	макс. 20
Толщина готовой полосы, мм	1,7...12 мм
Производительность, т/год	500 тыс.
Начало работы, г	1991



Рис. 3. Литейно-прокатный агрегат в Дуйсбурге

Табл. 2. Характеристики МНЛЗ

Количество машин	1
Количество полос	1
Размер плавки, т	100
Тип машины	Тонкослябовая МНЛЗ с прокаткой слитка
Толщина слитка, мм	60-80
Радиус машины, м	5,2
Поворотный стенд	Дроссельного типа с подъемником и весами
Стопорный стенд	Два независимых рычага с подъемными средствами
Мощность стопорного стенда, т	20
Тип кристаллизатора	Вертикально-радиальный с прямоугольным сечением
Механизм качания кристаллизатора	Гидравлическая приводная система
Вторичное охлаждение	Водовоздушное охлаждение
Режим операции	Выплавка и непрерывное литье
Количество клетей высокого обжатия	3
Тип	Четырех-валковые клетки с гидравлической системой AGC
Рабочие валки, мм	d=410; H=1500
Опорные валки, мм	d= 800; H=1400
Усилие прокатки, кН	макс. 13000
Мощность главного привода, кВт	500

Табл. 3. Характеристики оборудования на МНЛЗ

Делительные ножницы	Маятниковые
Сила реза, кН	10000
Температура реза, °С	350
Мощность, кВА	20000
Тип печи с моталками	Закрытого типа
Производительность	2 намотки
Внутренний диаметр рулона, мм	1300
Наружный диаметр рулона, мм	2300
Нагрев	Природный газ
Температура в печи, °С	макс. 1200

Табл. 4. Характеристики чистового стана

Количество клетей	4
Тип	Четырех-валковые клетки с гидравлическими системами АРСи UPCS
Диаметры рабочих валков, мм	700/600
Диаметры опорных валков, мм	1450
Длина бочки рабочих валков, мм	1900
Длина бочки опорных валков, мм	1400
Сила прокатки, кН	40000/25000
Мощность привода, кВт	6000/4000
Моталка	Трёхвалковая с пневматической регулировкой
Внутренний диаметр рулона, мм	762 (номинал)
Наружный диаметр рулона, мм	макс. 2000
Мощность привода, кВт	750

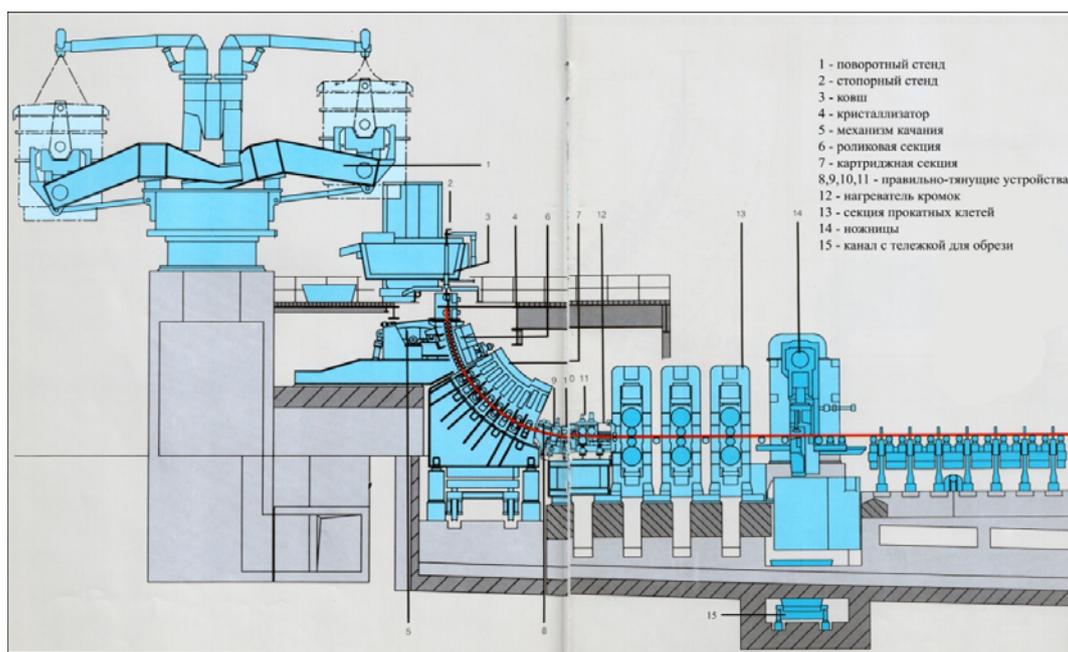


Рис. 4. Принципиальная схема компонентов МНЛЗ

100 тонн расплавленного металла доставляются до МНЛЗ с помощью специального ковша, установленного на вращающемся стелде. Другой стелд в это время устанавливает второй ковш в положение для его заполнения. Использование этих двух стелдов позволяет более гибкую работу, поскольку литье в две ёмкости увеличивает точность позиционирования ковша (т.к. ковш будет обладать меньшим весом) относительно традиционной установки ковша на рельсы. Кроме того, в момент заполнения одного ковша, второй может производить разливку металла, что значительно увеличивает быстрдействие.



Рис. 5. Машина непрерывного литья агрегата

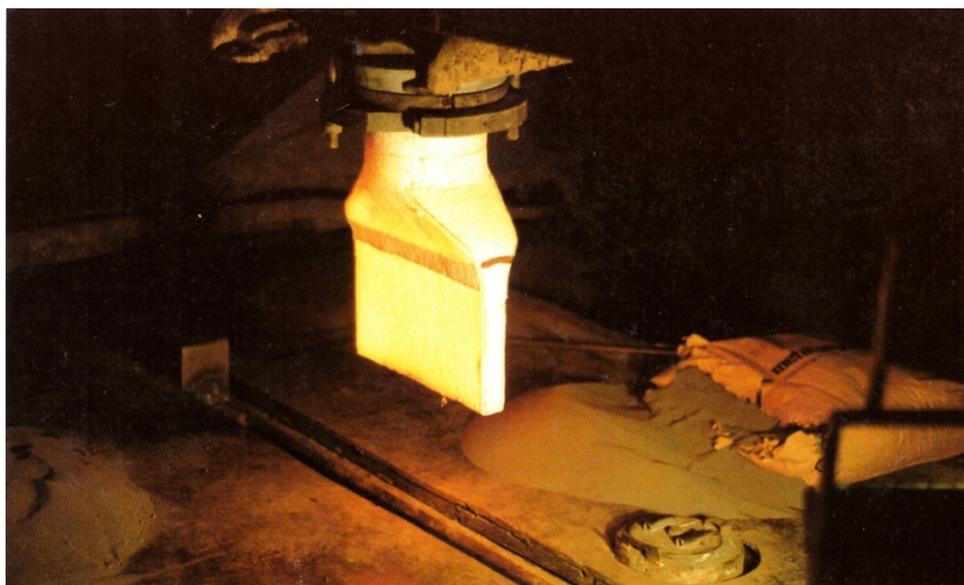


Рис. 6. Кристаллизатор и фрагмент заготовки

Кристаллизатор имеет вертикально-радиальную форму, созданную производителями для литья тонких слябов. Верхняя часть медных пластин кристаллизатора является вертикальной благодаря простым параллельным широким граням. Эта конструкция предоставляет достаточное пространство для стакана, и при его заполнении происходят только минимальные деформации, которые распределяются однородно по всей ширине полосы. Из-за её относительно простого профиля литейная форма может быть установлена во все типы литейных машин, имеющих вертикально-радиальный кристаллизатор. Кроме того, могут быть обеспечены все особенности процесса, такие как быстрая установка ширины полосы, изменение скорости литья и даже остановка полосы, замена сталеразливочного стакана и промежуточного разливочного устройства.

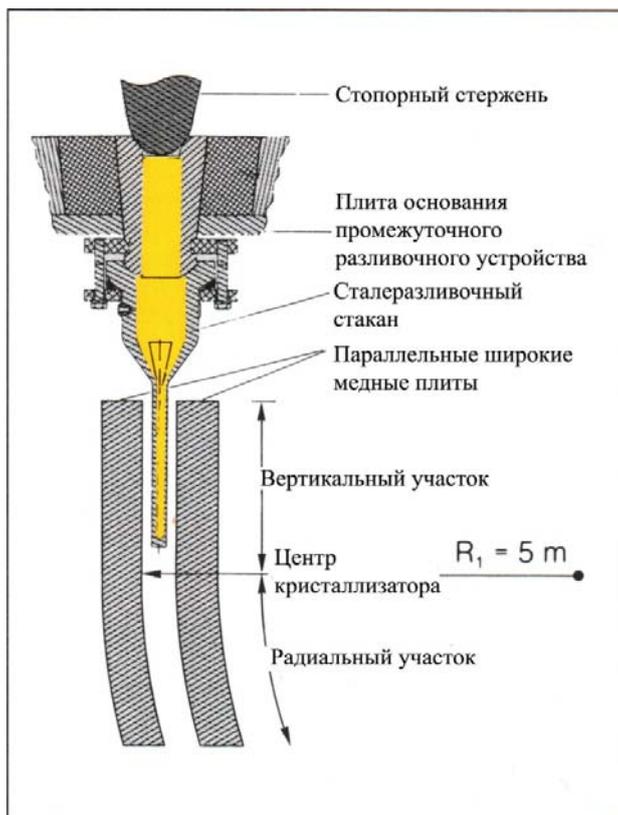


Рис. 7. Вертикально-радиальный кристаллизатор со сталеразливочным стаканом для литья тонких слябов

Сталеразливочный керамический стакан спроектирован специально для геометрии кристаллизатора. Улучшенное сопротивление растрескиванию и низкий износ на уровне расплавленной стали требуют новых материалов и процессов пластической обработки. Сталеразливочный стакан позволяет также использовать систему скользящей заслонки на промежуточном разливочном устройстве. Стакан общей толщиной 30 мм имеет толщину стенки 10 мм и ширину 250 мм. Жаростойкий материал получен методом изостатического прессования (метод порошковой металлургии, в котором применяется всестороннее сжатие порошка). Он состоит по существу из глинозёма графита, обогащенного нитридом бора и оксидом циркония. Устройство сталеразливочного стакана позволяет проводить литьё с максимальной производительностью в 3 т/мин.

За вертикальной частью кристаллизатора следует радиальная. Радиус разливочной машины составляет 5,2 м, полная длина медной части – 1000 мм. Опорные ролики нулевого сегмента, установленные под кристаллизатором, используются для поддержки широких граней полосы. Данные ролики не приводные.

Механизм качания кристаллизатора оборудован системой приводов, использующих два сервоуправляемых (Сервопривод – привод с управлением через отрицательную обратную связь, позволяющую точно управлять параметрами движения) гидравлических цилиндра. Система позволяет синусоидальное движение так же, как и другие виды колебаний, которые лучше всего соответствуют некоторым требованиям к прохождению процесса литья. Высота хода может быть отрегулирована непрерывно даже во время литья, в пределах +3.6 мм. Диапазон частот – до 400 ходов в минуту. Постановка привода такова, что система гидропривода может быть заменена системой электромеханического привода.

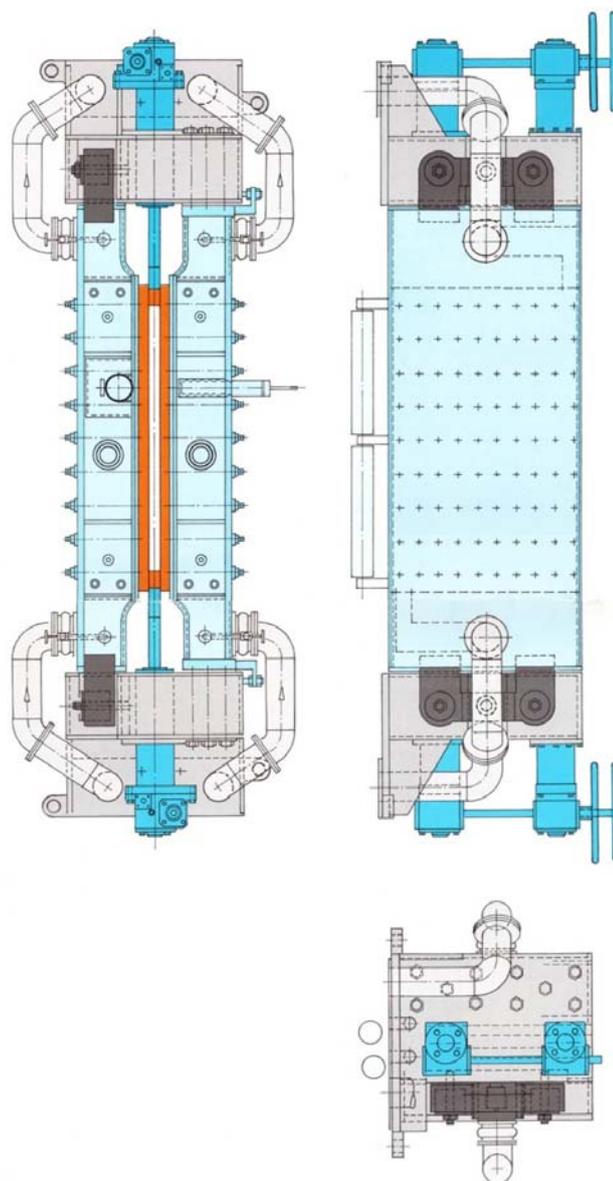


Рис. 8. Кристаллизатор с переменной шириной

Литьё полосы проводится в трёх зонах с помощью:

- 12ти пар роликов в 0 сегменте, установленном за кристаллизатором;
- 16ти пар валков в картриджной секции;
- 3х черновых клетей в блоке высокого обжата;

Уменьшение толщины начинается там, где сердцевина заготовки еще жидкая и продолжается до того момента, пока полоса не затвердеет. Машина спроектирована таким образом, чтобы заготовка полностью затвердела к последнему её сектору. «Сегмент 0» разработан как участок для уменьшения толщины полосы примерно на 15 %. Процесс характеризуется непрерывным уменьшением толщины с небольшим шагом, чтобы предотвратить неблагоприятное воздействие на затвердевание. Картриджная секция позволяет производить деформирование полосы там, где сердцевина еще жидкая, и там, где заготовка полностью затвердела. Она состоит из 18-ти гидравлически регулируемых пар валков и деформирует полосу примерно до 40мм толщиной. Характерной особенностью является непрерывное обжатие всей толщины на малых расстояниях.

Полоса перемещается на твёрдых сварных роликах, а охлаждение полосы производится в виде тумана(паровоздушное). Перед входом в сектор обжима, полоса проходит через промежуточные зоны (переходная зона) между картриджной секцией и тремя клетями, состоящими из:

- небольшой закрытой зоны;
- устройства для перемещения заготовки в первую деформирующую клеть;
- системы удаления окалины;
- небольшого нагревателя краёв полосы;

Главная цель - удалить окалину со сляба, выровнять температуру краёв заготовки и подать полосу к первой деформирующей клетке. Блок высокого обжата состоит из трёх прокатных клеток кварто и предназначен для деформирования затвердевшей полосы и придания материалу необходимой структуры для последующей прокатки. С его помощью, на выходе из МНЛЗ, толщина полосы составляет 15мм. Как только достигается необходимая толщина, полоса разгоняется.

Маятниковые ножницы нарежут горячую полосу на мерные длины. Можно резать слябы толщиной 15-30мм на определенную длину для определения структуры после нормализации. Слябы удаляются через транспортёр и могут продаваться как готовый продукт.

Тонкий сляб поступает по теплоизолированному рольгангу в индуктор. Оно обеспечивает равномерную температуру полосы и повышает общую температуру до уровня, необходимого для прокатки.

После нагревательной печи, каждая часть полосы сматывается моталкой. С помощью печи-моталки, сохраняется постоянная температура рулона. Эта печь оснащена двумя секциями намотки, установленными друг над другом. Она связывает два процесса с различными скоростями, что позволяет проводить прокатку на нормальной для данного процесса скорости. В то время, когда полоса сматывается на одном блоке, происходит одновременное разматывание (для последующей прокатки) на другом. Для процесса намотки полоса проходит через гидравлически регулируемую проводку. Моталка сматывает полосу со скоростью литья и определенным натяжением полосы. Чтобы поддерживалась постоянная температура полосы, во время намотки используется газовая нагревательная печь.

Для прокатки полосы в чистовой группе, секция печи поворачивается из положения намотки в положение разматки. Такая система с печью-моталкой носит название "СтемонаВох". Смотанный в рулон сляб проходит ряд водовоздушных обработок для удаления окалины.

Полоса направляется из секции СтемонаВох через сектор с тянущим валком, который подаёт полосу через ножницы и очиститель от окалины к чистовой клетке на скорости приблизительно 0,5...0,8 м/с. В случае неисправности ножницы отрезают тот отрезок полосы, который находится вне секции печи, если температура слишком мала для последующей прокатки

Стан горячей прокатки полосы состоит из печи с моталками, аварийных ножниц, системы очистки от окалины и четырехклетевого стана, работающего в непрерывном режиме. Фундамент заранее подготовлен к возможному увеличению количества клеток до пяти. Крупносортовую заготовку, прибывающую из горячей печи с моталкой, прокатывают в чистовых клетях до толщины минимум 1,7 мм. Температура полученной полосы – приблизительно 1050...1100°С с максимальной толщиной в 25 мм.

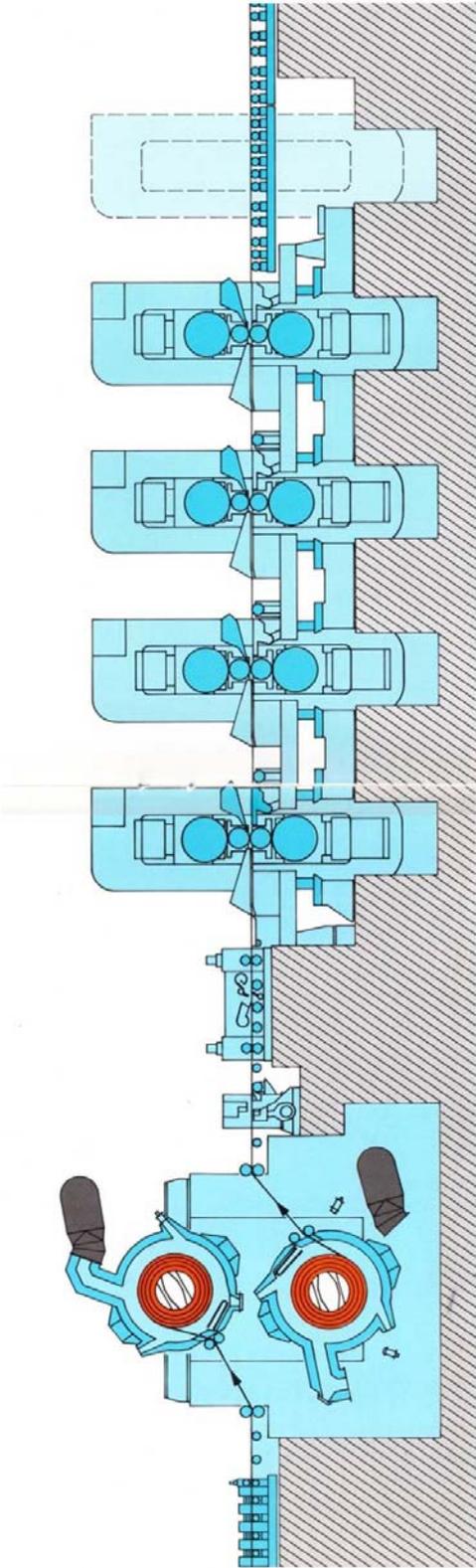


Рис. 9. Моталки Cremona Вохи чистовой стан агрегата



Рис. 10. Четырехвалковые клетки чистового прокатного стана

Преимущества чистового прокатного стана агрегата по сравнению с традиционными:

- Постоянная температура по всей длине полосы;
- Отсутствие необходимости ускорения;
- Относительно низкая скорость за клетью №4;
- Малое количество клетей;

Четырехвалковые клетки прокатного стана имеют гидравлическую систему для регулировки положения рабочих валков в соединении с Автоматическим Датчиком Контроля (AGC – Automatic Gauge Control) и Универсальным Контролем Профиля (UPC – Universal Profile Control), контролирующим перемещения и изгибы рабочих валков. Таким образом достигаются оптимальные допуски по толщине, профилю полосы и отклонения от плоскостности.

Готовая горячая полоса выходит из последней клетки с максимальной скоростью 10 м/с и проходит через многоуровневую охлаждающую систему, обеспечивающую температуру смотки рулона. После чистовой прокатки полоса поступает на конечную моталку, сматывается в рулоны и затем удаляется с линии.

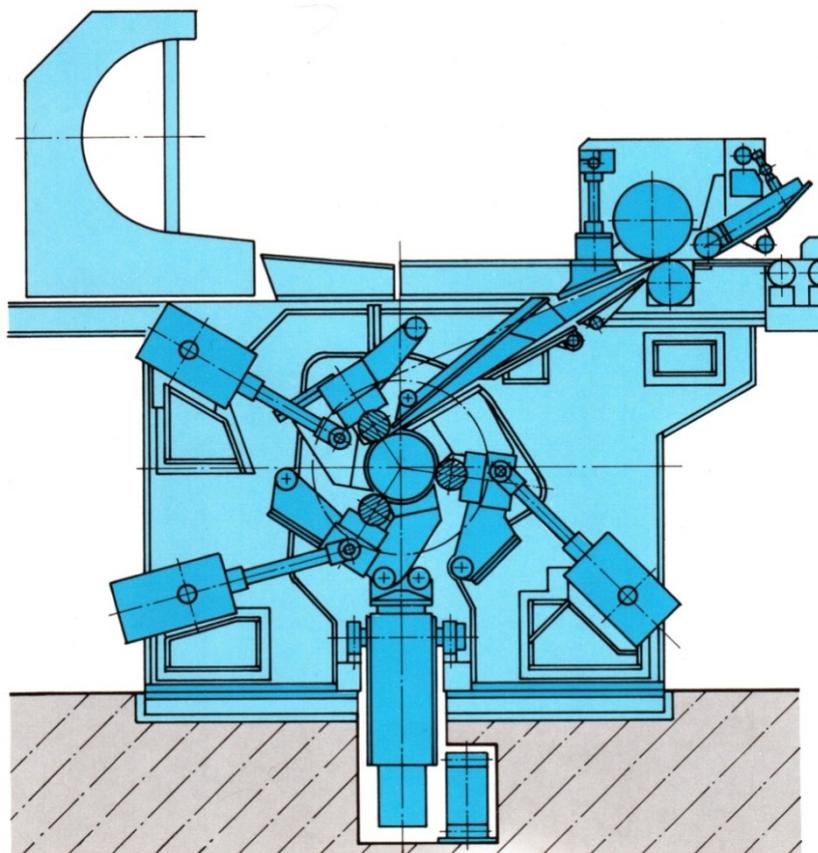


Рис. 11. Конечная моталка

- В каждом из трёх роликов моталки используются воздушные цилиндры в сочетании с механической регулировкой зазора.

- Прочная конструкция моталки из-за большого сечения вала моталки. Моталка может быть расширена до 4-х сегментов.

- Длительный срок службы оправки обеспечивается непрерывной смазкой и водяным охлаждением.

- Воздушные цилиндры имеют переменное давление, что обеспечивает амортизацию верхнего вала.

Размеры диаметра барабана управляются в зависимости от длины и толщины рулона.

На данном этапе можно сказать, что описанный выше агрегат для производства тонких слябов, составленный из машины непрерывного литья, печей с моталками и четырехклетового чистового прокатного стана кварто, имеют следующие достоинства:

- Компактная конфигурация цеха за счет прямого соединения МНЛЗ через индукционный нагрев и технологии намотки к чистовому прокатному стану: итоговая длина агрегата, начиная от сталеразливочного ковша и до конечной моталки, составляет примерно 180 м;

- Оптимальное использование тепла слитка для процесса прокатки, что обеспечивает постоянную температуру сляба в первой клетке чистового стана;

- Повышение механических характеристик и качества производимой продукции;

- Рентабельность даже при невысокой серийности;

- Сокращение капитальных затрат;

Высокое качество материала можно объяснить наличием мелкозернистой структуры, которая обеспечивается более коротким временем затвердевания сляба по сравнению с обычным толстым слябом, а также использованием технологии прокатки полосы с ещё жидкой сердцевиной LCR (Liquid Core Reduction).

На нескольких заводах России установлены такие литейно-прокатные агрегаты, а ряд вопросов отработки технологии решен выпускниками кафедры МТ10 МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Литература

1. *Mannesmann DemagHuttentechnik*I.S.P. Inline Strip Production Demag/Arvedi Technical Documentation
2. Перлов Н.И., Истеев А.И., Тюрин В.А. и др. Англо-русский металлургический словарь – М.: Рус.яз., 1985, 841 с.
3. *Официальный сайт Arvedi Group* - <http://www.arvedi.it>

УДК 621.771.014.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕКОНТАКТНЫХ ЗОН В ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Дмитрий Александрович Матурин, Андрей Игоревич Хоменко

*Студенты 3 курса,
кафедра «Оборудование и технологии прокатки»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Г.С. Никитин,
доктор технических наук, профессор кафедры «Оборудование и технологии
прокатки»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Внеконтактные зоны оказывают существенное влияние на кинематику и динамику процесса прокатки. Отсюда вытекает несомненная важность с теоретической и практической точек зрения исследований течения металла и распределения деформаций по объему очага деформации [1].

Геометрический очаг деформации, находится между валками прокатного стана. Экспериментально установлено, что пластическая деформация распространяется на определенную глубину h_g , а объем между очагами деформации – это зоны внеконтактной деформации. На рис. 1 видна зона внеконтактной деформации.

При осадке высоких цилиндров $H > 3 d c$, $\varepsilon \approx 5 \dots 10\%$ максимальная деформация имеет место лишь в поверхностных слоях. Силы трения на контактной поверхности сдерживают деформацию, причем внутренняя масса металла устремляется в стороны и образует возле торцов бочкообразные выпуклости. При вытяжке высоких полос внутренняя часть сечения полосы должна иметь такую же вытяжку, как и верхние приконтактные слои. «Чем меньше относительная величина подачи, тем больше удлинение» [3]. По А.Д. Томленову при вытяжке $l/h < 1$, в центральной части полосы появляются растягивающие напряжения, достигающие величины σ_s .

Удлинение внеконтактных зон приводит к появлению подпора для обжимаемой

части сечения полосы F_0 . С некоторым допущением можно считать, что весь смещённый объем идет на удлинение, а его размеры зависят от длины контакта (длина дуги захвата при прокатке) и глубины проникновения деформации h_g . Величина h_g определялась С.И. Губкиным, А.И. Целиковым, В.А. Ливановым, П.С. Истоминым. Более точно данная величина может быть определена численными методами. Влияние подпора на нормальное напряжение может быть учтено по формуле Симса коэффициентом n_σ'''

$$n_\sigma''' = 1 + \sigma_{II} / 2\sigma^* \quad (1)$$

где σ_{II} - напряжение подпора;

σ^* - напряжение растяжения во внеконтактной части сечения.

Нередко встречаются случаи, когда кроме продольных внеконтактных зон, действуют и боковые внешние зоны. Данные явления имеют место при прокатке квадратного профиля на ребро (рис. 2, а), а также при вытяжке полос круглого сечения в плоских бойках (рис. 2, б) и некоторых других, похожих по своей специфике технологических процессах, таких как прокатка двутавра (рис. 2, в), трубы на оправке (рис. 2, г) или полосы крестовидного сечения (рис. 2, д).

Во всех этих случаях есть обжимаемая часть сечения полосы и внеконтактная часть. Сила деформирования в этом случае во многом определяется площадями этих частей. Это обуславливается тем, что обжимаемая часть заготовки при деформировании будет иметь вытяжку, и внеконтактные зоны должны удлиниться на такую же величину. Они подвергаются растяжению, и именно растягивающие напряжения будут для обжимаемой части напряжениями «подпора».

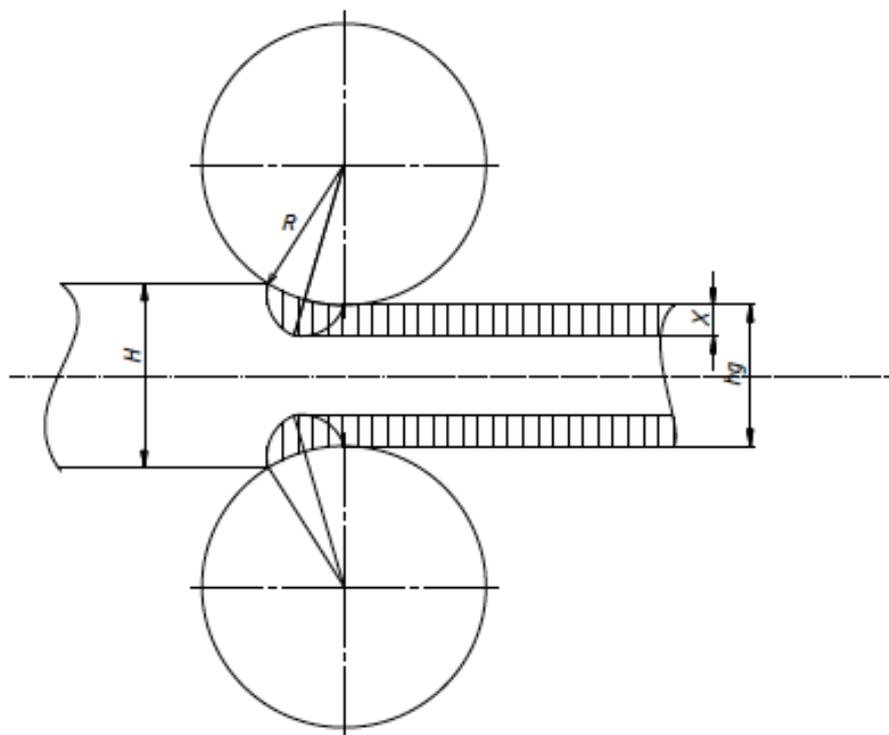


Рис. 1. Геометрия очага деформации при прокатке

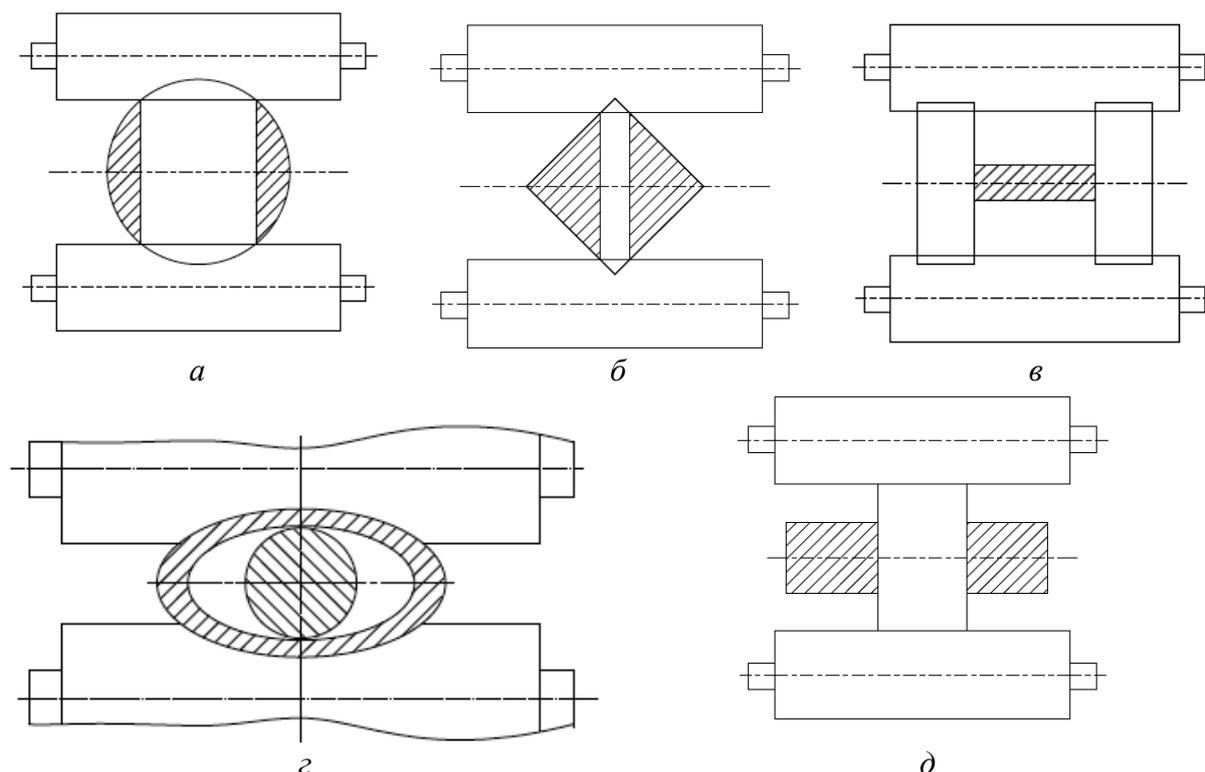


Рис. 2. Различные случаи внеконтактных зон

Влияние данных зон можно выявить при деформировании образцов из свинца двумя различными способами: сжатием прямоугольных образцов размерами l , b , h между параллельными бойками, и местным сжатием образцов значительно большей длины на участке, ограниченном длиной l [2]. Это исследование было проведено В.В. Смирновым и А.И. Целиковым, которые предложили учесть влияние «внешних зон» коэффициентом n''_{σ} :

$$n''_{\sigma} = P/P' = (l/h_{cp})^{-0,4} \quad (2)$$

Влияние боковых внеконтактных зон на зависит от отношения площади поперечного сечения F к площади обжимаемого сечения F_0 . В работе произведен сравнительный анализ данных полученных А.И. Целиковым и В.В Смирновым с расчетом значений коэффициента n''_{σ} по формуле Никитина Г.С.

$$n''_{\sigma_{бок}} = 0,6 + 0,4 F/F_0 \quad (3)$$

Где площади поперечного сечения F соответствует произведение геометрических размеров образца l и h , а площадь обжимаемого сечения:

$$F_0 = h_2 l \quad (4)$$

Глубина проникновения деформации $h_2 = 1,2l$, а l - длина контакта.

Исходя из полученных данных видно, что исследуемые методы по своим численным значениям несколько отличаются друг от друга. Причина различия в учете различных факторов.

Табл. 1. Значения коэффициентов n''_{σ} и $n''_{\sigma\delta}$

Размеры образца, мм		Отношение l/h	Метод Никитина (2 ^{ой} метод)	Метод Целикова (1 ^{ый} метод)
l	h			
30	5	0,167	2,600	2,20
15	2,5	0,167	2,600	2,15
25,5	5	0,196	2,300	1,80
30	7,5	0,250	1,933	1,73
25,5	7,5	0,294	1,733	1,50
30	10	0,333	1,600	1,60
15	5	0,333	1,600	1,52
25,5	10	0,392	1,450	1,42
30	15	0,500	1,267	1,40
15	7,5	0,500	1,267	1,30
25,5	15	0,588	1,167	1,17
15	10	0,667	1,100	1,16
15	15	1,000	0,933	1,08
30	30	1,000	0,933	1,00
25,5	30	1,176	0,883	1,03
15	30	2,000	0,767	1,05

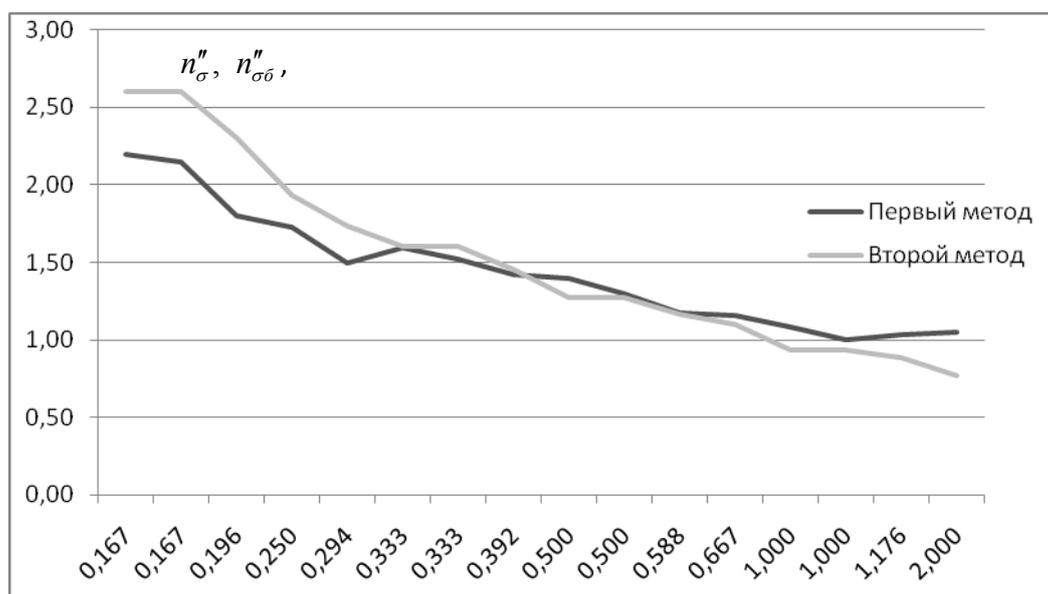


Рис.3. Зависимость коэффициентов n''_{σ} и $n''_{\sigma\delta}$

Несмотря на то, что расхождения в значениях этого коэффициента незначительны на данном исследуемом промежутке, они могут сильно различаться при исследовании образцов других геометрических размеров.

Данные расчета коэффициента по формулам (2) и (3) представлены в табл. 1.

На рис. 3 приводится сравнение значений n''_{σ} по формуле (2) и (3)

Может быть также использована и уточненная формула, определяющая влияние внеконтактных зон на процесс прокатки.

$$n_{\sigma\sigma}'' = 1 + \frac{0,4 F / F_0}{\left(1 + \frac{\mu l}{2 h_1}\right)} \quad (5)$$

Данная зависимость является универсальной и учитывает как отношения площадей, контактной и полной, так и отношение геометрических параметров заготовки l/h , коэффициент трения μ .

Более точное и качественное определение коэффициентов, непосредственно влияющих на расчет энергосиловых параметров процесса прокатки, ведет к получению более точного результата значений силы прокатки, контактного давления, и т. д., что в свою очередь приводит к увеличению производительности, снижению расхода металла и энергоносителей. Учитывая то, что машиностроение является весьма энергоёмкой отраслью тяжелой промышленности, дальнейшие исследования в области определения энергосиловых параметров всегда были и останутся приоритетными.

Литература

1. Константинов И.Л., Загиров Н.Н., Иванов Е.В. Конспект лекций по дисциплине «Теория процессов прокатки, прессования, волочения». – Красноярск, 2008. – 11 с.
2. Никитин Г.С. Теория непрерывной продольной прокатки: учеб. пособие. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 102 с.
3. Сторожев М.А., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением – М. : Машиностроение 1972. – 279 с.

УДК 621.771.262

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

Анна Алексеевна Солякова

*Студентка 3 курса,
кафедра «Оборудование и технологии прокатки»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Г.С. Никитин,
доктор технических наук, профессор кафедры «Оборудование и технологии
прокатки»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Увеличение грузоподъемности и как следствие длины составов железнодорожного транспорта, пуск скоростных поездов - все это требует применения высококачественных рельсов, а также организация их производства, разработки новых марок сталей для них совершенствования существующих технологий и оборудования.

Повышение качества проката как основополагающего фактора развития металлургической промышленности является актуальным направлением работы, так как позволяет обеспечить снижение материальных затрат, рост металло- и

энергосбережения при производстве готовой продукции и повысить ее конкурентоспособность на мировом рынке.

Традиционная технология проходит следующим образом:

Нагревают непрерывнолитую заготовку (НЛЗ) в печи с шагающими балками (ПШБ) производительностью 250 т/час, отапливаемой природным газом. Продвижение заготовок в печи осуществляется с помощью системы подвижных и неподвижных балок, продолжительность нагрева заготовок в печи составляет около 3.5 часов, температура нагрева 1180...1240 °С.

НЛЗ, нагретая в ПШБ, по рольгангам подается на стан горячей прокатки. На стане заготовка прокатывается на требуемый профиль последовательно на четырех клетях:

- обжимной клетки 900 (катающий диаметр валков 935..1100 мм, длина бочки - 2300 мм, привод электродвигателем мощностью 5500 кВт)
- черновой линии клетей 800, (с приводом электродвигателя мощностью 8100 кВт, катающий диаметр валков 760..1300 мм, длина бочки 1800 мм)
- чистой клетки 850 (электродвигатель мощностью 2000 кВт).

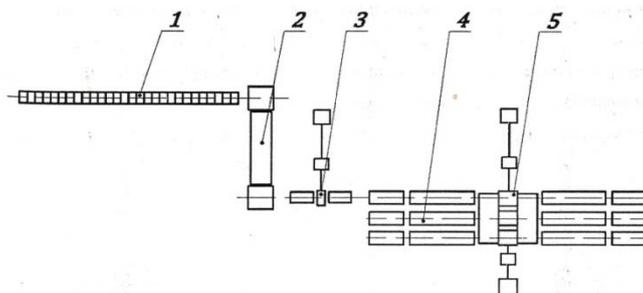


Рис. 1. Схема расположения рельсобалочного стана трио:
1 - подводный рольганг, 2 - нагревательная печь, 3 - реверсивная клетя дуо,
4 - раскатное поле, 5 - клетя дуо и трио

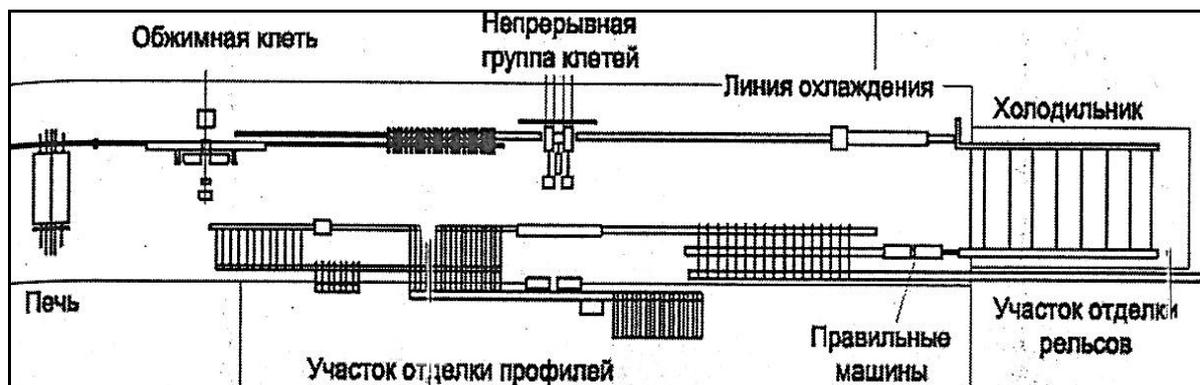


Рис. 2. План расположения оборудования рельсобалочного стана фирмы SteelDynamicsInc

После прокатки в чистой клетке раскаты по рольгангу передают на резку. Для этого установлено 6 салазковых пил горячей резки. Диаметр пил 1400...1600 мм, скорость вращения 1028 об/мин.

Далее, порезанные раскаты поступают на четыре группы горячих стеллажей, оборудованных шлепперами. Длина каждой группы 49900 мм, ширина 12000 мм.

Но есть **и другая технология**, которая является более современной - процесс прокатки с применением универсальных клетей, разработанных фирмой «SMSMeer».

Схема такого стана приводится на рисунке (рис. 2):

В состав стана входит печь с шагающими балками для подогрева непрерывнолитых квадратных и балочных заготовок. В след за печью расположен первичный окалиноломатель. Далее располагается двухвалковая обжимная клетка, в которой происходит обжатие непрерывнолитой заготовки до предчистового профиля. Вторичный окалиноломатель расположен перед входом в клетки непрерывной группы (тандем) и гарантирует полное отсутствие окалины на поверхности раската перед чистовыми проходами, которые проводят в компактной группе клеток, включающей универсальную черновую клетку, выдвижную эджерную клетку и универсальную чистовую клетку.

Также этот стан оборудован участком водяного охлаждения (технология RailCool™), расположенным между последней клеткой прокатного стана и холодильником. На этом участке производят локальное охлаждение балок для повышения их механических свойств и снижения остаточных напряжений. Благодаря этой технологии выравнивается температура по сечению профиля и исключается предварительный изгиб рельсов на холодильнике, а также упрочняется головка рельса.

Холодильник оборудован комбинированными транспортировочными системами: по нему можно перемещать прокат до 73 м. За холодильником следуют горизонтальная и вертикальная роликовые правильные машины, пакетировочное, упаковочное и отгрузочное оборудование. На участке контроля качества рельсы подвергают ультразвуковой дефектоскопии для выявления внутренних дефектов и контролю с помощью вихревых токов для обнаружения поверхностных дефектов, далее идет контроль прямизны и геометрии профиля рельсов. Затем рельсы режут на готовые длины (до 73 м).

Преимуществом технологии является одновременная и равномерная деформация всего поперечного сечения профиля. На протяжении всего процесса прокатки форма головки рельса остается практически неизменной, т.е. сводится к минимуму риск образования дефектов в виде гребней или складок.

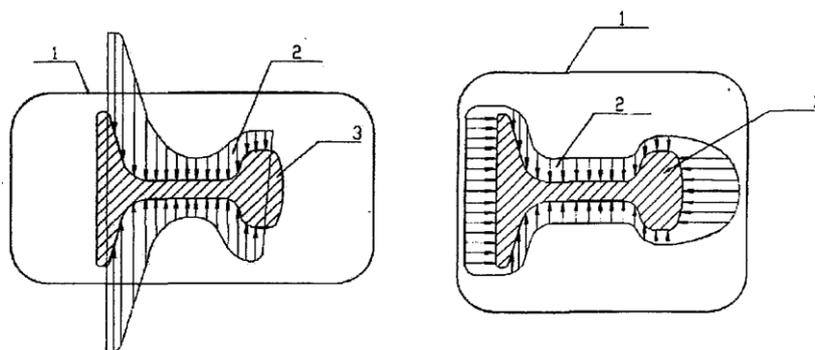


Рис. 3. Сравнение калибровок традиционных двухвалковых клеток (слева) и универсальных клеток (справа) и универсальных клеток (справа): 1-исходный профиль, 2-профиль после черновых проходов, 3-готовый профиль

Рельс принадлежит к числу так называемых несимметричных профилей и характеризуется неодинаковым распределением металла между отдельными его частями. Поэтому невозможно достигнуть одинакового обжатия всех частей профиля при любой системе калибровки. Наибольшее обжатие получает шейка, а головка и подошва обжимаются слабее. Вследствие материальной связанности всех частей профиля при неодинаковом обжатии их происходит вынужденное удлинение менее

обжимаемых участков, что неизбежно сопровождается образованием внутренних напряжений. Последнему способствует еще такие факторы, как прокатка с большей скоростью более обжимаемых участков и с меньшей менее обжимаемых (в соответствии с разницей в диаметрах валков); более интенсивное охлаждение фланцев подошвы из-за того, что размеры их меньше, и они образуются раньше при вынужденном уширении в первых пропусках.

Существует много различных систем калибровки валков для прокатки рельсов, но все они имеют следующие общие характерные особенности.

1. Все калибры по форме разделяются на две основные категории: ребровые и пластовые, или рельсовые. Вначале обычно располагают ребровые калибры, а потом рельсовые.

2. Для всех калибров следует считать характерными два коэффициента: средний коэффициент вытяжки за все пропуски, который в большинстве случаев находится в пределах 1,20...1,22, и коэффициент вытяжки в последнем, чистовом калибре, нормально равный 1,07...1,09. Первый коэффициент оценивает калибровку в целом. Чрезвычайное его увеличение отрицательно сказывается на качестве рельсов, так как приводит к возрастанию внутренних напряжений. Второй коэффициент характеризует не только величину внутренних напряжений, но и степень износа чистовых калибров. Чем меньше этот коэффициент, тем более благоприятны условия работы валков; минимальная практическая величина его равна 1,07.

Большую часть калибровок рассчитывают с 9-10 фасонными калибрами (в зависимости от расположения стана) На рис. 4 показана калибровка валков для прокатки рельсов, которая получила наибольшее распространение. В ней предусмотрено 4 ребровых и 6 рельсовых калибров. В первом ребровом калибре заготовка разрезается глубоким клином, а затем фланцы подошвы развертываются в других ребровых калибрах.

Этот метод калибровки рельсов предусматривает устранение недостатков, связанных с первичной кристаллизацией стали, которая характеризуется значительным развитием столбчатых кристаллов, перпендикулярных поверхности слита, и образованием подкорковых пузырей.

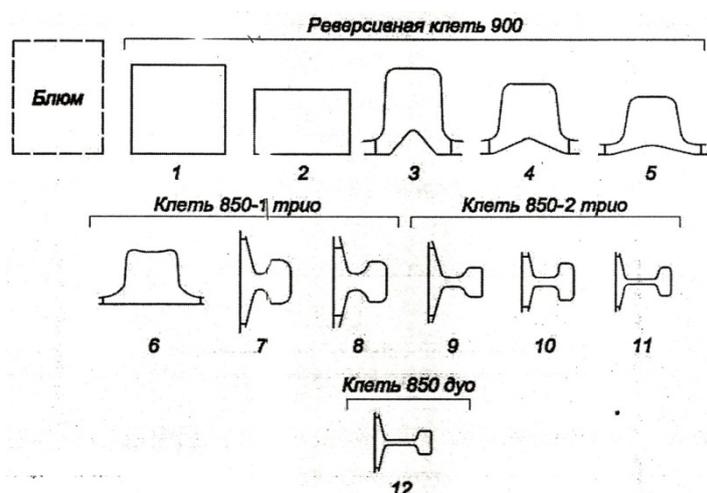


Рис. 4. Калибровка валков для прокатки рельсов (1..12 –номера пропусков)

При энергичной деформации столбчатые кристаллы и газовые пузыри меняют перпендикулярное подошве направление на параллельное ей, в результате чего тенденция к образованию трещин в рельсах значительно уменьшается.

Схема калибровки рельсобалочного стана с универсальными клетями приведена на рис. 5. Поперечное сечение профиля, поступающего в предчистовой проход, формируется из непрерывнолитой заготовки в обжимной клетке. Все чистовые проходы выполняют в клетях непрерывной группы: три прохода в универсальной черновой клетке и один проход в универсальной чистовой клетке.

В связи с тем, что идет значительный рост цен на энергоносители в себестоимости проката, то становятся актуальными работы по созданию энергосберегающих технологий. По традиционной технологии прокатки на рельсобалочных станах нагрев заготовок в методических печах проводился до температуры 1200...1280С^о, а прокатка в клетях «трио» начиналась при температура 1140...1190С^о. Разработаны математические модели для определения энергосиловых параметров и температуры в реверсивной клетке и в непрерывной группе клетей.

При прокатке в непрерывной группе клетей (система SMSMeer) расчеты следует вести **по программе**, разработанной совместно с МГТУ и Н.Э. Баумана.

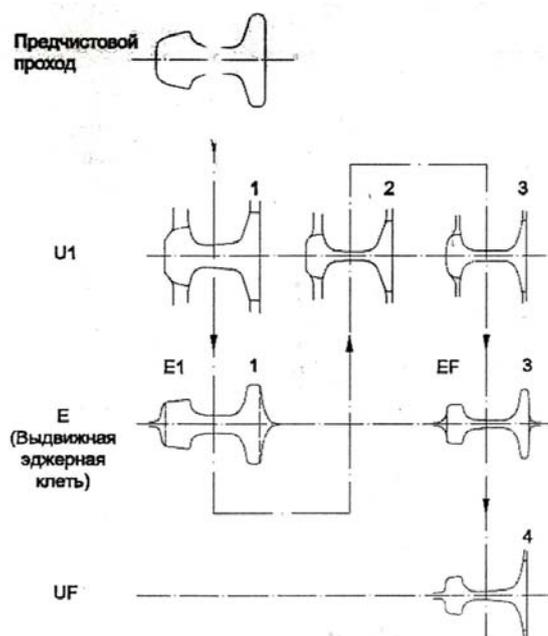


Рис. 5. Схема универсальной прокатки в компактной группе клетей

Табл. 1 . Результаты расчета энергосиловых параметров в обжимной клетке

№	σ_{ϕ} , МПа	p_{cp} , МПа	P, кН	M, кН*м	Tвход	Tвых
1	110,05	166,71	7182,65	1295,93	1099,6	1105,8
2	118,90	170,51	8083,55	1379,65	1104,5	1112,4
3	122,15	157,59	5543,83	1385,07	1110,7	1121,8
4	129,15	173,23	7642,24	1330,15	1119,3	1131,6
5	108,29	146,11	2548,69	510,25	1128,4	1134,8

Математическая модель позволила провести анализ процесса прокатки при различных температурах с учетом разности температур переднего и заднего концов раската.

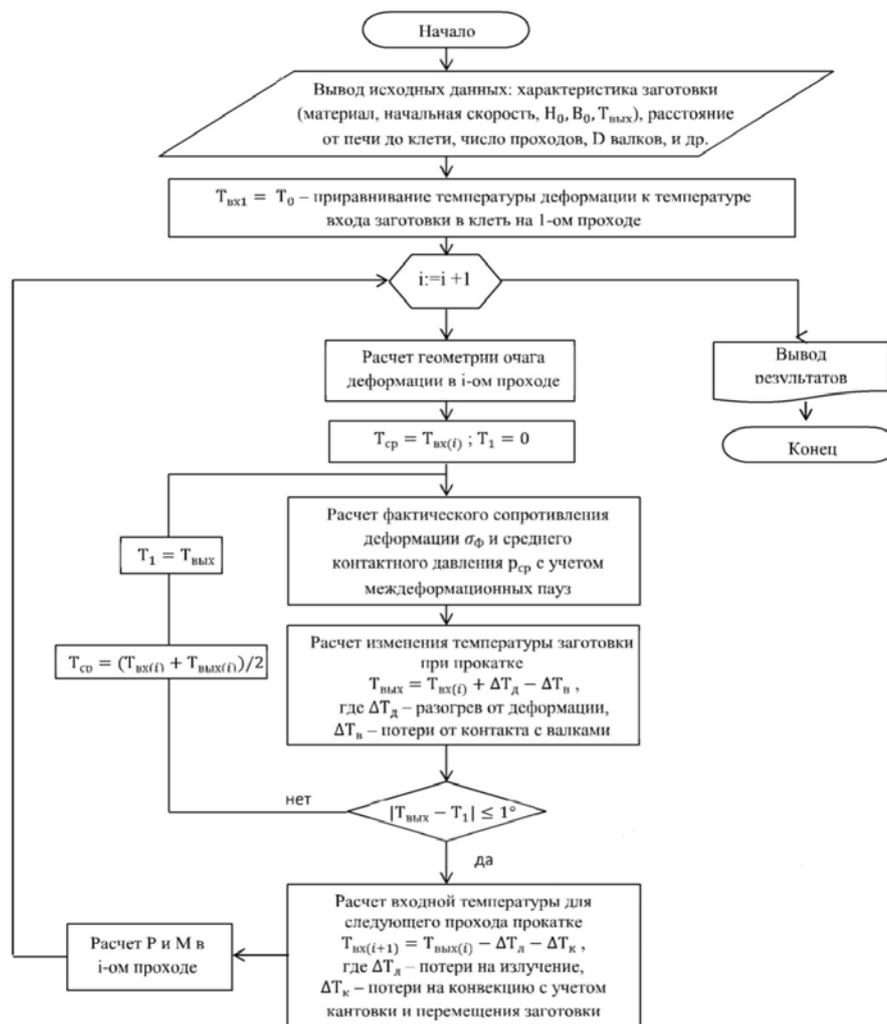


Рис. 6. Блок-схема алгоритма расчета энергосиловых параметров

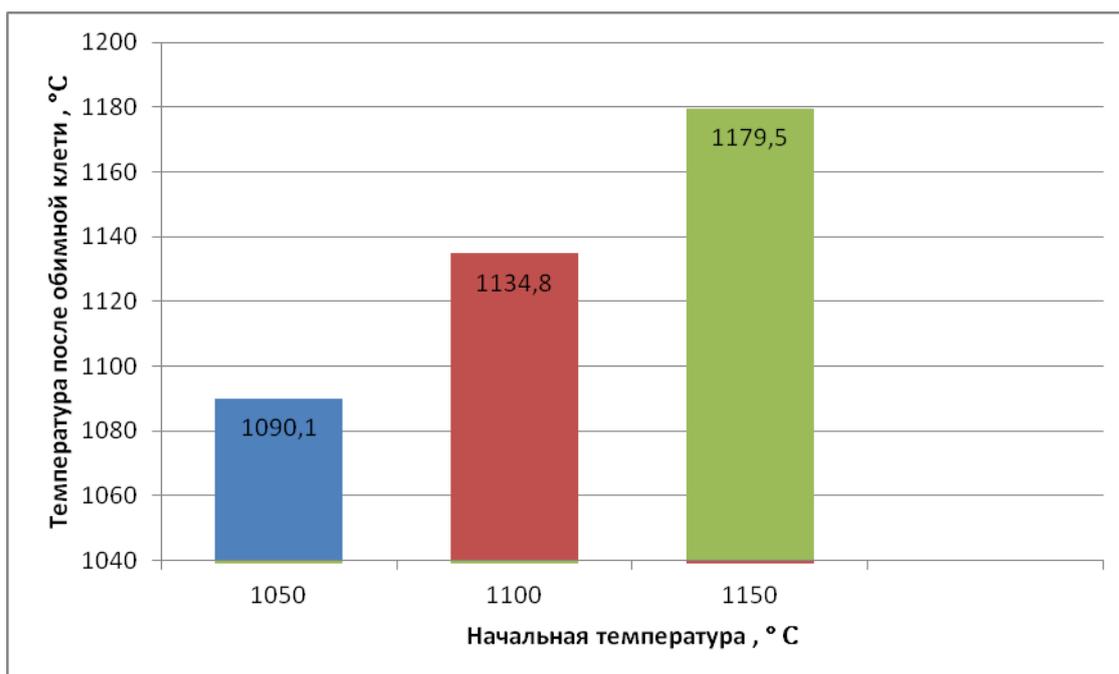


Рис. 7. Температура раската после обжимной клетки при различных начальных температурах заготовки

По результатам анализа можно сделать вывод о возможности снижения начальной температуры прокатки в клетях 900 до 1050...1100 °С и увеличении скорости прокатки (увеличение числа оборотов двигателя с $n=70$ об/мин до $n=100$ об/мин). При этом разность температуры переднего и заднего концов снизится вдвое. Это и позволит уменьшить расход энергии на нагрев на 15...20% и увеличить темп нагрева в методической печи.

Эта же модель использована и для прокатки в клетях трио и чистовой клетки дуо. Также, разработана новая форма чистового калибра, позволяющая обеспечить стабильность размеров профиля, повышение долговечности рельсов, снижение веса погонного метра продукта, повышение производительности. Разработаны меры по увеличению ресурса валков. Разработана и запатентована технология производства рельсов с повышением износостойкости из стали с содержанием углерода до 0,90% и микролегирующими добавками ванадия (0,07...0,08%) и азота (0,02...0,017%).

Проектирование технологических процессов прокатки на рельсобалочных станах и решение задач оптимизации технологий связаны с определением энергосиловых параметров – силы и момента прокатки в каждой клетке. Следует отметить, что существенное влияние на расход энергии и качество проката оказывают температурный режим прокатки, зависящий от исходной температуры, распределение обжатий по клетям и скорости прокатки. Поэтому расчет технологических и энергосиловых параметров требует учета совместного влияния всех вышеперечисленных факторов и представляет собой сложную задачу.

Сила прокатки определяется произведением среднего нормального контактного напряжения p_{cp} и горизонтальной проекции площади соприкосновения металла с валком F :

$$P = p_{cp} \cdot F$$

Среднее нормальное контактное напряжение определяется физико-механическими свойствами металла и граничными условиями:

$$p_{cp} = \gamma \cdot n_{\sigma} \cdot \sigma_{\phi}$$

где γ – коэффициент, позволяющий учесть влияние среднего главного напряжения на среднее контактное напряжение,

n_{σ} – коэффициент напряженного состояния, учитывающий влияние контактного трения, геометрии и формы очага деформации, внешних зон, натяжения полосы;

σ_{ϕ} – фактическое сопротивление пластической деформации, определяющееся на основе данных о температурно-скоростных и деформационных условиях процесса. Расчет ведется по кривым, построенным на основе экспериментальных данных.

Крутящий момент на валках представляю в виде соотношения:

$$M = 2P \cdot l \cdot \mathcal{G},$$

где l – плечо силы P относительно оси вращения валка;

\mathcal{G} – коэффициент плеча силы P .

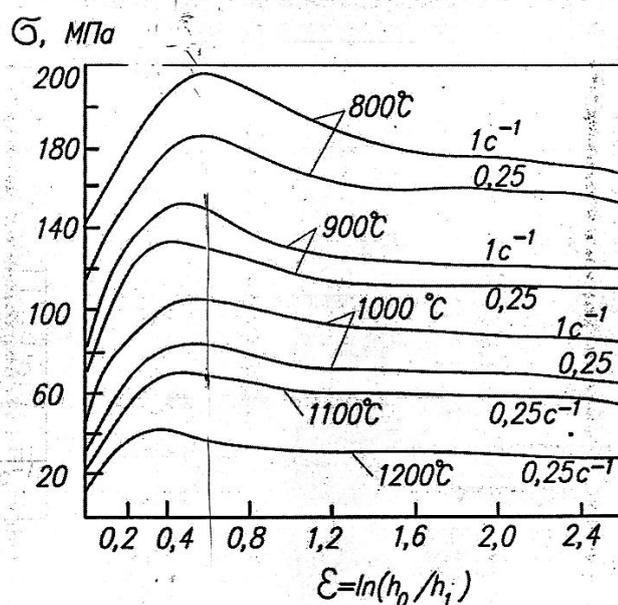


Рис. 8 Кривые деформационного упрочнения рельсовой стали при непрерывном деформировании

Для расчета температурных режимов прокатки и определения энергосиловых параметров необходимо знать значение температуры металла в любой клетке стана. Т.к. температура заготовки при прокатке меняется от клетки к клетке вследствие теплоотдачи, отдачи теплоты валкам при контакте с ними, а также вследствие разогрева, вызванного деформацией, то зная температуру металла в клетке, мы можем определить энергосиловые параметры и температурный интервал с учетом прочностных возможностей стана и качества готовой продукции.

Определим температуру некоторого сечения заготовки на выходе i -ой клетки T_i :

$$T_i = T_{i-1} - \Delta T_n - \Delta T_g - \Delta T_k + \Delta T_o,$$

где T_{i-1} - температура проката на выходе из предыдущей клетки;

ΔT_n - снижение температуры за счет излучения между клетями;

ΔT_g - снижение температуры за счет теплоотдачи валками в i -ой клетке;

ΔT_k - снижение температуры за счет конвекции между клетями;

ΔT_o - повышение температуры за счет тепловыделения от работы деформации.

Определим составляющие по формулам:

$$\Delta T_n = \frac{2(B+H) \cdot L_n \cdot \alpha_s \cdot (T_i - T_s)}{\dot{m} \cdot c},$$

где B и H - ширина и высота полосы;

L_n - длина проката или расстояние между клетями;

T_s - температура среды;

\dot{m} - секундная масса металла;

c - удельная теплоемкость.

Снижение температуры заготовки вследствие контакта с валками, проводками и охлаждения водой можно рассчитать по эмпирической зависимости:

$$T_6 = \frac{k_T \cdot l (T_i - T_{ц.в.})}{H_1 \cdot v_{np} \cdot \rho \cdot c},$$

где k_T - коэффициент, зависящий от времени контакта металла с валками и толщины окалины;
 l - длина дуги захвата;
 $T_{ц.в.}$ - температура центра валка;
 H_1 - высота проката после пропуска;
 v_{np} - скорость прокатки;
 ρ - плотность металла.

Для определения разогрева металла за счет работы пластической деформации используется следующая зависимость:

$$\Delta T_\delta = \frac{\rho_{cp} \cdot L n \frac{H_0}{H_1}}{\rho \cdot c} \eta$$

где H_0 - высота проката до пропуска;

η - коэффициент, учитывающий потери теплоты в окружающую среду.

В среднем считают, что потери теплоты через конвекцию составляют 1...5% от потерь теплоты излучением. В расчетах принимают: $\Delta T_k = 0,03 \Delta T_l$

Расчет температурного режима включает в себя предварительное определение сопротивления пластической деформации и среднего контактного давления по ходу прокатки в каждой клетке, значения которых зависят от температуры металла в очаге деформации.

Выводы:

1. Сделан анализ современной технологии прокатки рельсов.
2. Разработаны программы, отличающиеся тем, что расчет ведется для реверсивной прокатки.
3. Полученные результаты позволяют предложить уменьшение температуры нагрева, увеличение темпа нагрева, и как следствие, повышение производительности.

Литература

1. *Зароцинский М.Л.* Технологические основы проектирования прокатных станов. 1962 – С 152-157
2. *Никитин Г.С.* - Теория непрерывной продольной прокатки. 2009.-370с.
3. *Металлургическое производство и технологии, №2/2006*, Производство рельсов высокого качества с использованием компактных универсальных клеток и технологии RailCool.

УДК 669.013

НОВЫЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ЗАВОДЫ В ЦЕНТРЕ РФ

Анна Алексеевна Солякова

*Студентка 3 курса,
кафедра «Оборудование и технологии прокатки»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Г.С. Никитин,
доктор технических наук, профессор кафедры «Оборудование и технологии
прокатки»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Черная металлургия служит базой для развития машиностроения и металлообработки. Следовательно, развитие черной металлургии важный критерий оценки развития страны. Развитие любого производства (особенно металлургического) тесно связано с развитием науки и техники, а также подготовки специалистов.

В нашем вузе десятилетиями ведется работа по подготовке специалистов, перед которыми рано или поздно возникнет вопрос: *Куда пойти работать!?* Проблема выбора заключается в том, что студенты не знают возможные варианты, где бы были нужны их знания. Именно поэтому многие работают не по своей специальности или в другой сфере. Чтобы понимать, где искать работодателя, я хотела бы рассказать о некоторых предприятиях, которые возможно позже смогут помочь при ответе на выше поставленный вопрос.

•Хотелось бы начать с нового предприятия- *Калужского научно-производственного электрометаллургического завода (КНПЭМЗ)*, ввод в эксплуатацию, которого, намечено на середину-конец 2012 года.



Рис. 1. КНПЭМЗ (вид сверху)



Рис. 2. Продукция рязанского трубного завода

Поставщиком оборудования для электроплавильного цеха завода выступил ведущий мировой производитель оборудования по производству стали – фирма VAI. Дуговая сталеплавильная печь с применением новой технологии выплавки стали Ultimate будет сочетать высокую удельную электрическую мощность (более 1 МВт) и возможность заправки всего объема металлошихты в печь «в одну бадью» на плавку. Двухпозиционная установка печь-ковш обеспечит обработку металла в двух сталковшах, находящихся в разных позициях поочередно. Восьмиручьева сортовая МНЛЗ (Машина непрерывного литья заготовок) позволит производить непрерывную разливку металла сериями до 43 плавов без остановки агрегата на переналадку. Тем самым до 99 % повышается выход годной заготовки. Данная технологическая линия будет самой производительной на территории РФ и одной из лучших в мире. Степень газоочистки, устанавливаемой на предприятии, составляет более 99 %. (максимальное значение на старых заводах около 60 %).

Поставщиком сортопрокатного оборудования выступает не менее известный производитель – SMSMeer. Ключевым элементом прокатного комплекса является высокопроизводительный стан. В комплекс также входит нагревательная печь, обеспечивающая минимальное образование окалины на поверхности заготовок в печи и низкий удельный расход природного газа, и участок отделки и упаковки проката по европейским стандартам.

Т.к. на заводе основной агрегат – электродуговая печь, то строится 50-километровая линия электропередачи, тогда энергия на площадку будет подаваться по постоянной схеме. Также завершено сооружение водовода от реки Протвы и ведутся работы по устройству насосной станции.

Несмотря на то, что завод называется «мини», на предприятии будет работать 1400 сотрудников, которых обещают обеспечить высокой заработной платой и социальными гарантиями.

•Следующее предприятие - «Рязанский трубный завод», который был основан в 2001 году в городе Рязань, именно тогда был запущен первый стан по производству профильных электросварных труб.

В ноябре 2010 года был запущен проект цинкования продукции собственного производства. Трубный прокат, полученный с применением горячего цинкования, обеспечивает защиту металла от коррозии до 25-30 лет, применяется в изготовлении конструкций, эксплуатируемых в агрессивной природной среде. Оцинкованная труба подходит для изготовления металлоконструкций используемых в строительстве дорожных ограждений, сельскохозяйственных комплексов, в нефтехимическом производстве. Сегодня завод представляет собой предприятие полного производственного цикла, основное направление которого производство трубного

проката. Завод обеспечен современным европейским оборудованием и необходимой транспортной и энергетической инфраструктурой.

Еще один завод, продукцией которого являются трубы – Московский трубный завод «ФИЛИТ». Это предприятие, специализирующееся на производстве электросварных, холоднодеформированных круглых, прямоугольных и квадратных высококачественных труб из углеродистых и нержавеющей марок стали, а также сплавов.

Для производства труб из высоколегированных сталей диаметром 8...25 мм, необходимых при изготовлении трубчатых электронагревателей (ТЭН), на заводе установили и ввели в эксплуатацию четыре трубоэлектросварочных агрегата изготовленных в Японии. Был установлен новый трубоэлектросварочный агрегат «20–76» для производства труб из углеродистых сталей, оснащенный новой системой формовки и калибровки труб (ЦТА), разработанный австрийской фирмой «Фест-Альпина». Для обеспечения трубоэлектросварочных агрегатов высококачественной заготовкой установлены три новых агрегата продольной резки.

Наличие современного оборудования и высококвалифицированных кадров позволило в 1999 году внедрить на заводе систему качества, предусматривающую контроль планирования и ведения производственного процесса и контроль продукции.

Также, в феврале 2012 г. Московский трубный завод «Филит» планирует запустить новый стан ТВЧ (ток высокой частоты). Соответственно существенно увеличатся мощности. Сейчас действующие мощности составляют порядка 400 т. , в то время как новый стан позволит эту цифру увеличить до 1,5 тыс. т.

ОАО «Щелковский металлургический завод» – уникальное для России металлургическое предприятие, вобравшее в себя новейшие достижения инженерной мысли российских НИИ и достижения ведущих западноевропейских компаний. ОАО "Щелмет" - единственный в России завод, производящий высококачественную сверхтонкую ленту из холоднокатаной стали и сплавов со сверхнизким содержанием углерода и заданным уровнем механических и физических свойств. Завод выпускает продукцию для автомобильной, электроламповой, кабельной промышленности, приборостроения, предприятий по производству аккумуляторных батарей и химических источников питания и др. 2000 год - ОАО "Щелмет" вошло в состав Объединенной металлургической компании (ЗАО "ОМК"). Возобновлено производство прецизионной полосы.



Рис. 3. Продукция московского трубного завода

В 2003-2004 годы - Покупателями профильной продукции - холоднокатаной полосы для производства теневых масок, магнитных экранов и диафрагм кинескопов цветных телевизоров становятся как российские, так и зарубежные фирмы, такие как фирма "LG Micron" (Корея), "Thomson" (Польша), ОАО "Теневая Маска" (Москва), фирма "Берлин-Самсунг" (Германия). Были проведены успешные опыты по прокатке рулонной меди толщиной от 0,03 мм. В 2005 году – на заводе начал функционировать склад труб и трубодеталей, произведенных предприятиями группы ОМК.

В 2008 год – начали производство труб в пенополиуретановой изоляции.

В 2009 год – был выпуск в кооперации с ОАО «ММК» первой в РФ опытной партии белой жести двукратной прокатки толщиной 0,15- 0,16 мм по ГОСТ Р 52204.

2011 год – система менеджмента качества ОАО «Щелмет» прошла сертификационный аудит на соответствие требованиям ГОСТ Р ИСО 9001-2008 применительно к производству и поставке труб стальных в пенополиуретановой изоляции с защитной оболочкой. Завод оснащен всеми коммуникациями: электроэнергия, природный газ, системы водоснабжения (включая градирню), очистки и транспортировки промышленных стоков, собственная котельная и компрессорная. Завод оснащен системой охраны и электронной пропускной системой.

Всё оборудование, произведенное ведущими европейскими компаниями, находится в отличном состоянии и имеет большой ресурс. ОАО «Щелмет» сохранил технический и технологический персонал, необходимые для производства любых видов продукции.

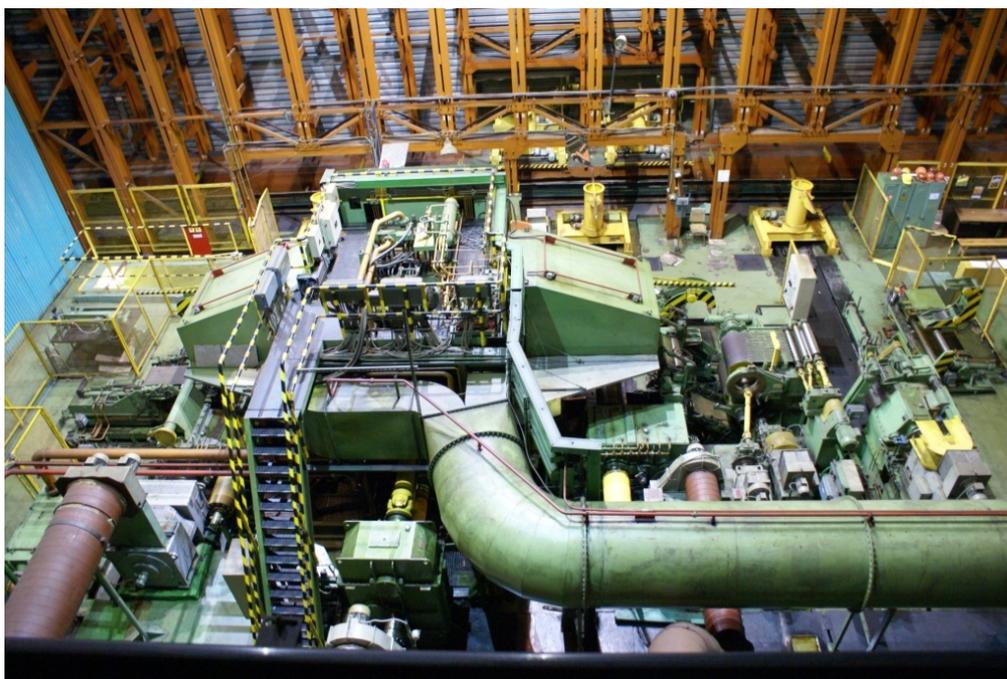


Рис. 4. Общий вид стана



Рис. 5. Колпаковые печи для отжига плотномотанных рулонов

На ОАО «Щелмет» размещено следующее оборудование:

1. Линия инспекции с встроенным прокатным станом КВАРТО 920 Sundwig (Германия) – назначение 100% контроль качества полосовой стали и первичная разбивка разнотолщинности и неплоскостности полос, входная толщина полос от 1,0 до 2,3 мм.
2. Линия прокатного стана 800-назначение – прокатка полос до толщин 0,07...0,10 мм.
3. Линия перемотки рулонов - для осуществления смотки с заданным натяжением, используется всегда перед и после отжига плотномотанных рулонов,
4. Участок отжига плотномотанных рулонов, где происходит проведение рекристаллизационного отжига рулонов;
5. Участок отжига «распушенных» рулонов – проведение глубокого обезуглероживания металла, на участке так же установлена линия «распушения» и обратной смотки рулонов;
6. Линия правки растяжения – получают высококачественный плоский тонкий прокат и смотка металла в отгрузочный рулон;
7. Линия продольной резки.
8. Вальцешлифовальная мастерская в составе 3 станков с ЧПУ «Геркулес» и машина EDT для нанесения микротекстуры на рабочие валки;
9. Линия химического обезжиривания – происходит тепловая и химическая мойка поверхности полос;
10. Высокостеллажный склад, необходимый для хранения и обеспечения всех линий и участков металлом;



Рис. 6. Правильная машина



Рис. 7. Линия обезжиривания

В состав завода также входят объекты энергетического хозяйства, ремонтно-механический и деревообрабатывающие цеха.

В настоящее время ОАО «Щелковский металлургический завод» представляет собой производственный комплекс, оснащенный оборудованием для выпуска прецизионной холоднокатаной полосы, расположенный на собственной территории площадью более 12 гектаров, с удобным автомобильным подъездом и ж/д сообщением.

•ОАО «Тулачермет» (Группа «Кокс»). Специализируется на выпуске чугуна и другой продукции, такой как: чугун передельный, чугун литейный, чугун нодулярный, синтиком, щебень, граншлак. Объем выпуска составляет ориентировочно 2...3 млн. тонн чугуна в год. В планах развития – строительство кислородно-конвертерного цеха мощностью 2 млн. тонн стали в год. В состав цеха будут входить МНЛЗ для отливки слябовых заготовок. В 1992-1995 годах – был пущен в эксплуатацию цех

шлакопереработки и шлакоблочных изделий, вошел в эксплуатацию цех по производству бытовых проточных газовых водонагревательных аппаратов, была введена в эксплуатацию малогабаритная установка придоменной грануляции шлака. А в 2001 году- была рекордная выплавка за всю историю предприятия - 205 тыс. т. за год.

•Хотелось бы добавить в этот список - «Электросталь» - первенец качественной металлургии, трудовая биография которого, началась 17 ноября 1917 года.

Сегодня ОАО "Металлургический завод Электросталь" сохраняет и совершенствует производственный потенциал и поставляет на отечественный и зарубежный рынок широкую гамму высококачественной металлопродукции: поковки, шайбы, прутки горячекатаные и кованые, пресс-изделия, холоднотянутую проволоку, горячекатаный лист, холоднокатаную ленту.

Действующая на заводе система качества прошла проверку на соответствие требованиям международного стандарта ИСО 9002. Продукция ОАО "Металлургический завод Электросталь" сертифицирована Союзом работников технического надзора TUV (Германия). Потребительские свойства продукции отвечают требованиям международных стандартов.

Обладая высоким научным потенциалом и современным оборудованием для производства высококачественного металла, предприятие является лидером качественной металлургии, поставляющим на отечественный и зарубежный рынок широкую гамму высококачественной металлопродукции.



Рис. 8. Завод «Электросталь»

Также привожу краткое описание и других заводов, которые могли бы вызвать интерес:

- ООО «Волжский Электрометаллургический завод» . Находится в г. Иваново и является новым предприятием, закладка которого состоялась в 2008 году. Этот микро-завод имеет задачу по переработке регионального лома, выплавки стали и производстве горячекатаной арматуры III класса. Пуск первой очереди – стана горячей прокатки намечен на июнь 2012 года, пуск второй очереди в составе сталеплавильного производства и МНЛЗ на декабрь 2012/март 2013 года.

- ЗАО «Королевский трубный завод» - новое предприятие, основанное в 1996 году в составе двух трубных станов ТЭСА 20-114 и ТЭСА 12-50 (пущен в эксплуатацию в 2008 году). Также на предприятии имеется агрегат продольной и поперечной резки,

линия по производству просечного листа, механомонтажный участок и цех механической обработки.

•ЗАО «Волга Трубопрофиль» в г. Волгореченске, Костромской области. Завод имеет в составе три трубных стана ТЭСА 20-114, ТЭСА 10-623, линию продольной резки, механический участок и объекты инфраструктуры. В 2011 году был открыт новый участок в г. Ярославль с пуском стана ТЭСА 10-50 и агрегата продольной резки.

•ЗАО «ГазПромВолгореченский трубный завод» в г. Волгореченск, Костромской области. Он имеет три трубных стана ТЭСА 20-114, ТЭСА 114-318, линию продольной резки, механический участок и объекты инфраструктуры.

•ООО «Кулебакский электрометаллургический завод» (ОАО «Русполимет»). Продукция завода – слитки гладкие круглого сечений, поковки, ферросплавы и лигатуры, сортовой и фасонный прокат. Принято решение о строительстве нового мелкосортного стана и развитии сталеплавильной части.

•ООО Торговый дом «Нижегородский металлообрабатывающий завод» (бывшее ОАО «Горьковский металлургический завод»). Происходит производство слитков и проката из конструкционной, конструкционно-легированной, хромистой, нержавеющей, жаропрочной, инструментальной, инструментально-легированной стали; слитков из специальных марок стали для предприятий, занимающихся производством поволоков и их обработкой; прокат из рядовых марок стали для строительной отрасли, а также из специальных марок стали для машиностроения, производства инструмента, штампов и прессформ, износостойких элементов железнодорожного транспорта; переплав лома черных металлов, а также производство промышленных ножей и пил, применяемых, практически, во всех сферах производственной деятельности.

•ОАО «Выксунский металлургический завод». Производит электросварных прямошовных труб различного диаметра для добычи и транспортировки нефти и газа, строительства, жилищно-коммунальной сферы. Также продукцией являются железнодорожные колеса для пассажирских и грузовых вагонов, локомотивов, поездов метрополитена.

•ЛПК «ОМК-Сталь». Продукцией является горячекатаный стальной плоский прокат в рулонах, лист и штрипс для производства труб малого и среднего диаметра с высокими потребительскими свойствами.

В заключение хотелось бы сказать, что с таким достаточно длинным списком заводов, можно с уверенностью сделать вывод, что в области металлургии нужны специалисты и для них найдутся рабочие места.

Литература

1. Сорокина Н. КНПЭМЗ – будем знакомы. – Металлоснабжение и сбыт. №11.2011.- С.40-42.

2. *Официальный сайт:*

Московский трубный завод «Филит» - www.filit.ru

Металлургический завод «Электросталь» - www.elsteel.ru

Рязанский трубный завод – www.demidovsteel.ru

ОАО «Щелковский металлургический завод» - www.schelmet.com

ОАО «Тулачермет» - www.tulachermet.ru

ООО «Кулебакский электрометаллургический завод» - www.ruspolymet.ru

ООО Торговый дом «Нижегородский металлообрабатывающий завод» - nmz-nn.narod.ru

ОАО «Выксунский металлургический завод» - оао-вмз.рф

Секция №11
Электронные технологии в машиностроении

УДК 621.3.049.75

ИССЛЕДОВАНИЙ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ. ЗАПОЛНЕННЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ОТВЕРСТИЯ

Игорь Юрьевич Балашов

*Студент 4 курса,
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

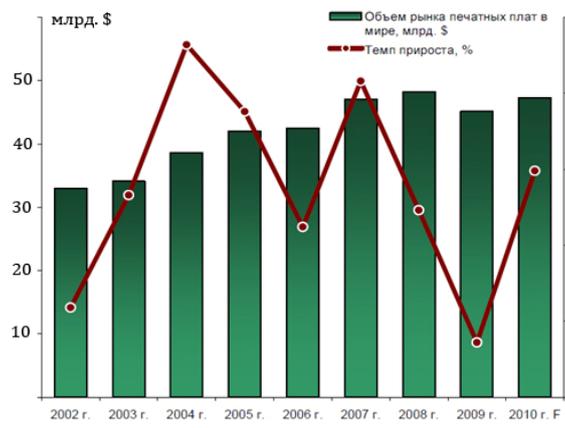
*Научный руководитель: Р.Ш. Тахаутдинов,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в
машиностроении»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

1. Введение. Тема данной работы очень актуальная именно сейчас, когда повышение уровня интеграции и степени трассировки стало замедляться, ввиду того, что практически достигнуты известные пределы минимизации компонентов, и менять теперь приходится не сами микросхемы, а принципы разработки и технологии производства печатных плат. За последние несколько лет было высказано множество мнений, опубликовано книг и зарегистрировано множество патентов в разных странах для решения этой проблемы. Одно из наиболее интересных решений состоит в том, чтобы делать переходные отверстия многослойных печатных плат внутри контактных площадок, так называемых «*via in pad*». При этом отверстия по ряду причин должны быть заполненными – «*Filling vias*», и как раз вот здесь и встает *главный вопрос*, который и исследуется в данной работе, - «Как заполнить такие отверстия?».

Ниже *будут рассмотрены* наиболее перспективные и уже сейчас внедряемые в производство *технологии изготовления заполненных отверстий*, их преимущества и недостатки. Но более подробно будет исследован новый метод, предложенный русским инженером Павловым. В ходе данной работы *была выполнена разработка тестовой печатной платы*, содержащая более 120 сложных компонентов типа QFP или BGA, и содержащая общее количество тестируемых переходных отверстий более 26 тыс. штук. По результатам тестирования/испытания данной печатной платы уже можно будет судить о перспективах развития технологии Павлова – заполнения переходных микроотверстий.

2. Актуальность. Каждому технически подкованному человеку знакомо понятие печатной платы, и ее роль в современных технологиях.

«В начале XX века немецким инженером Альбертом Паркером Хансоном, занимавшимся разработками в области телефонии, было создано устройство, считающееся прототипом всех известных сегодня видов печатных плат. «Днем рождения» печатных плат считается 1902 год, когда изобретатель подал заявку в патентное ведомство родной страны. Печатная плата Хансена представляла собой штамповку или вырезание изображения на бронзовой (или медной) фольге. Получившийся проводящий слой наклеивался на диэлектрик – бумагу, пропитанную парафином. Уже тогда заботясь о большей плотности размещения проводников, Хансен наклеивал фольгу с двух сторон, создавая двустороннюю печатную плату. Изобретатель также использовал идущие насквозь печатной платы соединительные отверстия. В работах Хансена есть описания создания проводников при помощи гальваники или проводящих чернил, представляющих собой измельченный в порошок металл в смеси с клеящим носителем...»



Источник: Ассоциация IPC, EICP

Рис. 1. Динамика мирового рынка печатных плат, млрд. \$

Прошло уже более сотни лет, но только теперь, за последние 20 лет, стало понятно, насколько значимое изобретение сделал Хансон. Сегодня ни одно конкурентоспособное промышленное, измерительное или бытовое оборудование невозможно представить без использования печатных плат.

Исследования «Российского Рынка печатных плат» ведущей аналитической компании России – «РосБизнесКонсалтинг», опубликованные в марте 2011 года, и которые сейчас оцениваются в 50 тыс. рублей, показывают, что за последний год оборот от мирового производства печатных плат вырос более чем на 6%, что составляет примерно 15 млрд. долларов, в денежном эквиваленте.

Ожидается, что этот рост с 2012 года станет ускоряться и вместо текущих ~300 млрд. \$, к 2015 году оборот от производства печатных плат достигнет более 500 млрд. \$. Основной эпицентр производства и развития печатных плат на 2010 год, конечно же, в Китае и Японии:

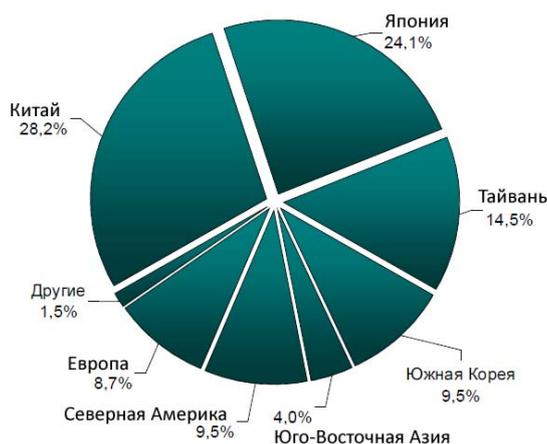


Рис. 2. Географическая структура мирового рынка печатных плат на 2010г.

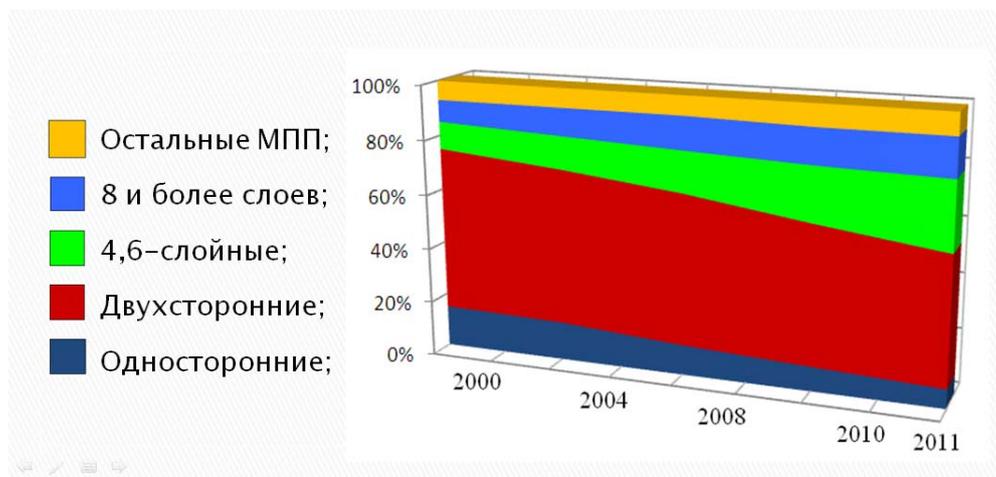


Рис. 3. Распределение объемов рынка печатных плат в России

Все это касается актуальности сферы производства ПП в целом и доказывает тот факт, что данное производство уверенно набирает обороты, и что данная отрасль весьма и весьма привлекательна, ее стоит развивать и что самое главное, в ней не стоит отставать.

Также интересен тот факт, что примерно 2/3 от всего дохода производства ПП, составляют доходы от многослойных печатных плат, в то время как объемы их производства составляют всего 25...30%.

Это объясняется высокой удельной стоимостью МПП, которая превышает удельную стоимость двухсторонних печатных плат в 2...3 раза.

Рост объемов производства МПП вполне понятен, причем не только с экономической точки зрения. С появлением на рынке хорошо зарекомендовавших себя компонентов с матричным расположением выводов, начали возникать определенные трудности с соединением таких компонентов с другими компонентами печатной платы.

Стандартный вид разводки такого типа компонентов представлен на рис.4. Для такого количества выводов возможна разводка на одной стороне ПП. Максимально сложный осуществимый вариант односторонней разводки представлен на обложке справочника по печатным платам, изображенным на рис.5. Подобного типа разводка осуществима, только если шаг между выводами компонента не менее 1 мм. Тем не менее, большее количество выводов расположенных внутри уже имеющихся на одной стороне развести не получится. Тогда как же быть в случае, если количество выводов будет зашкаливать за 1000? или расстояния между двумя контактными площадками будет хватать только для одного-двух проводников?

Ответ напрашивается сам: использовать дополнительные внутренние слои, а значит переходить к МПП – многослойным печатным платам. К примеру, для таких устройств как процессоры (рис. 6.), для трассировки требуется от 12 до 24 (на 2009 год) слоев.

Итак, переход к МПП весьма закономерен, очевиден и актуален, остается доказать актуальность нашей конкретной темы – создания заполненных микроотверстий. Для того, чтобы доказать это, нужно рассмотреть сначала простые отверстия.

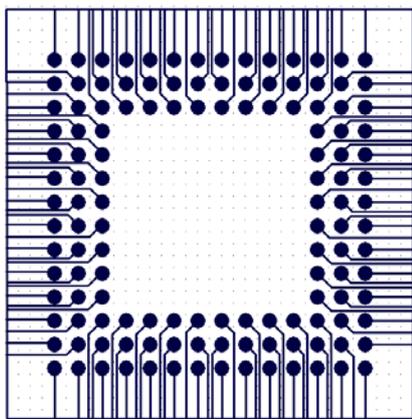


Рис. 4. Пример разводки BGA компонента со 161 выводами.

Рис. 5. Пример предельно возможной односторонней разводки BGA компонента



МПП состоит из множества слоев, большинство из которых представляют собой сложные электрические цепи. Для того, чтобы вся плата могла функционировать как единое устройство, необходимо соединить соответствующим образом все эти цепи между собой. Для этого служат как и в случае двухсторонней печатной платы, металлизированные отверстия. Технологии создания переходных отверстий очень важны, так как в большинстве своем именно они определяют качество, стоимость и всю технологию производства многослойной печатной платы.

3. Переход от отверстий к заполненным отверстиям

В случае многослойных печатных плат переходные отверстия бывают трех видов:

- Сквозные – «*throughhole*»;
- Глухие – «*blind vias*»;
- Скрытые (слепые) – «*buriedvias*».



Рис. 6. Пример компонента с матричным расположением выводов (кол-во выводов ~1600)

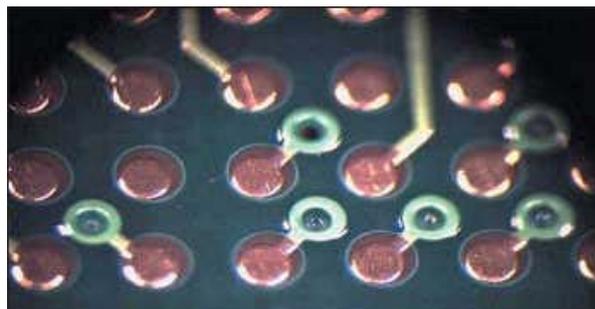


Рис. 7. Пример трассировки BGA компонента

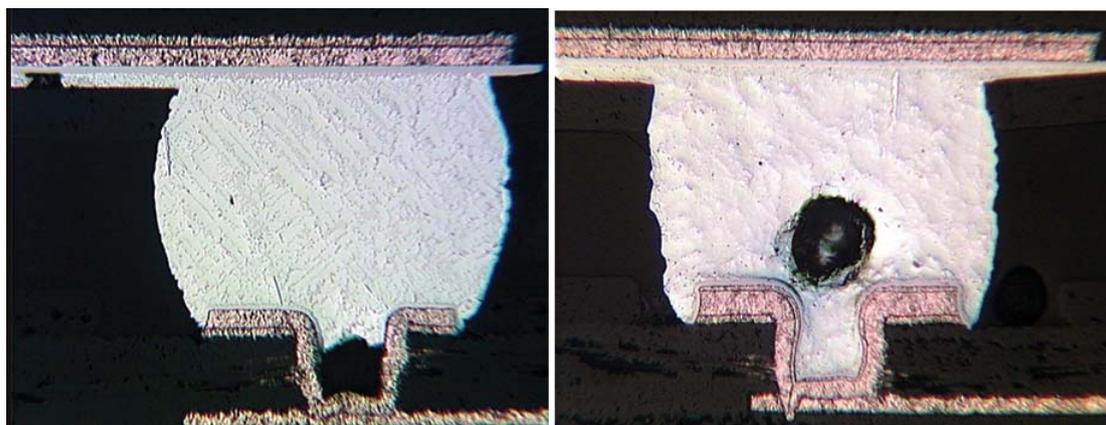


Рис. 8. Дефекты при пайке BGA компонентов на контактные площадки с отверстиями

В данной работе будут рассмотрены в основном глухие (blind) отверстия, которые соединяют внешний слой с любым внутренним. Пример трассировки BGA компонента с помощью глухих переходных отверстий на внутренние слои, представлен на рис. 7. Как видно из этого рисунка, переходные отверстия отводят в сторону от самих контактных площадок, в результате чего снижается трассировочная способность, и как следствие, эффективность использования полезной площади ПП. Площадь, занимаемая переходным отверстием хоть и мала, но все же, в месте, где необходимо сделать такое отверстие уже будет невозможно провести проводник.

Несмотря на подобного рода недостатки, эта технология вполне успешно прижилась, и сейчас практически на любом производстве МПП используют именно эту технологию. Основная причина в том, что она обеспечивает трассировку BGA компонента с практически любым количеством выводов. Вопрос лишь в том, сколько слоев необходимо для этого. К примеру, для широко используемого компонента фирмы Xilinx XC2V4000 в корпусе BGA с 1225 выводами с шагом 1,27 мм требуется для трассировки более 8 слоев.

Здесь приходит вполне очевидная мысль: *«А почему не делать переходные отверстия прямо внутри контактных площадок?»*. И ведь действительно, если выполнить переходные отверстия внутри самих контактных площадок, то переходное отверстие не будет занимать полезной площади, и число слоев необходимых для трассировки того же компонента XC2V4000 уменьшится до 3-4 слоев. Резко возрастет трассировочная способность и эффективность использования полезной площади ПП.

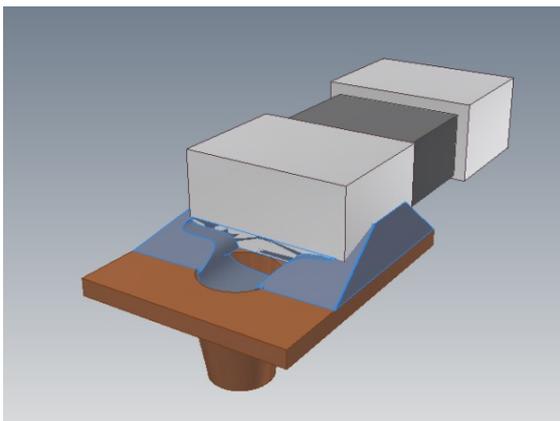


Рис. 9. Дефекты при пайке пассивных элементов на примере резистора. (модель выполнена в программе AutodeskInventor 2009)

Но здесь возникают следующие проблемы. Как оказалось, если выполнить переходные отверстия прямо внутри контактных площадок (так называемых «*via-in-pad*»), возникают недопустимые дефекты во время пайки самих компонентов. Причина этих дефектов состоит в том, что припой во время припаивания компонента стекает в отверстие либо происходит разрушение шариковых выводов BGA компонента. Сущность этого дефекта изображена на рис. 8-9.

Подобные дефекты приводят не только к механическому повреждению выводов или механическому ослаблению контакта, но также ухудшают электрические свойства контакта, что, впоследствии, скажется на функционировании всей платы. В худшем случае, контакта и вовсе может не произойти.

Следовательно, нужно не допустить стекание припоя в отверстие или разрушение выводов припаиваемых компонентов. Поэтому и необходимы *Fillingvias*, -заполненные отверстия.

4. Основные проблемы и характеристики заполненных отверстий

Заполнение отверстий можно осуществить различными способами, и с помощью различных материалов. В последнее время стали отдавать предпочтение специальным пастам, как проводящим так и не проводящим. При заполнении такими пастами огромную роль играет ее состав, поэтому производство самой такой пасты уже достаточно сложная задача. Производство пасты должно быть подвержено тщательному контролю.

В случае если в качестве материала-заполнителя выбрана специальная паста, то при заполнении могут возникнуть следующие проблемы:

- газовые включения внутри пасты;
- различие КТР пасты и основного материала платы;
- Слабая адгезия пасты, металлизации отверстия, фоторезистов, диэлектрических покрытий;

Есть так же способы, при которых заполнение происходит хорошо знакомыми материалами – медью (см. пункт 5.5.), или смолами. Главная проблема в случае заполнения отверстий этими материалами – недостаточность заполнения.

Основными характеристиками заполняемых отверстий, которые влияют на процессы и качество заполнения являются:

- диаметр отверстия, d ;
- соотношение сторон, d/l .

5. Технологии создания заполненных отверстий

После того как появилась необходимость создания Fillingvias, стали появляться различные разработки, патенты на технологии заполнения отверстий различными способами. Число их сейчас уже более 10, но в данной работе мы рассмотрим 5 основных технологий, которые либо уже внедрены, либо в настоящее время внедряются в производство и имеют ощутимые преимущества над остальными.

5.1. Заполнение через шаблон («Screenprinting»)

Данный метод используется для заполнения отверстий не проводящими материалами (non-conductivematerials).

Сущность метода:

Подготовка пакета слоев

плата, в которой необходимо выполнить заполненные отверстия фиксируется вместе с внешним доп. слоем, выступающим в роли шаблона

Механическое сверление

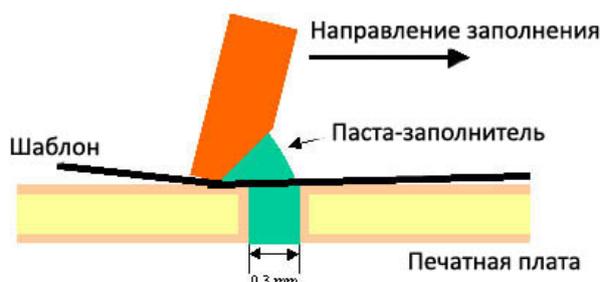
Стандартное выполнение операции сверления как и в случае незаполненных отверстий

Заполнение отверстий под давлением ракеля

На поверхность шаблона наносят пасту-заполнитель, и под воздействием ракеля продавливают пасту в отверстия

Снятие слоя-шаблона

Ниже представлены схема процесса и фотография производственного процесса заполнения отверстий данным способом.



Преимущества заполнения через шаблон:

- Отверстия, которые нет необходимости заполнять защищены шаблоном;
- Технологически простые и хорошо известные операции;
- Возможность проведения, как без помощи, так и с помощью специального оборудования;

Недостатки заполнения через шаблон:

- плохое качество заполнения, процент заполнения отверстия ~ 60-80%

Даже в случае применения специального оборудования результат заполнения будет выглядеть следующим образом:

- В случае маленьких отверстий с диаметром менее 300 мкм возникает сложность проникновения пасты внутрь отверстия и выхода воздуха из него;
- Шаблон необходим для каждого слоя заполняемых отверстий.
- Максимальное отношение d/h (aspectratio): 1/10.



Следует отметить, что подобным методом хоть и можно выполнить заполнение отверстий вручную, но необходимо помнить, что качество заполнения будет плачевным. Для сравнения заполнения данным способом отверстий вручную и с помощью специального оборудования на рис. 10 представлен рентгеновский снимок, на котором отчетливо видно образование пустот и неполноту заполнения отверстий пастой-заполнителем.

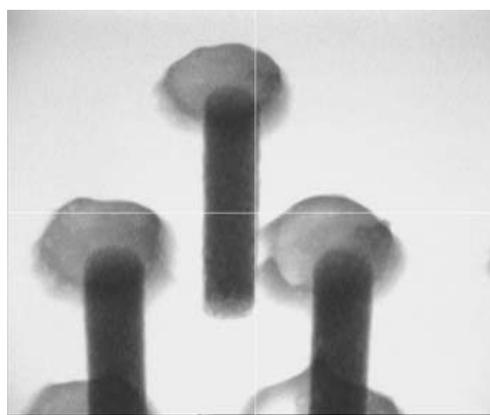
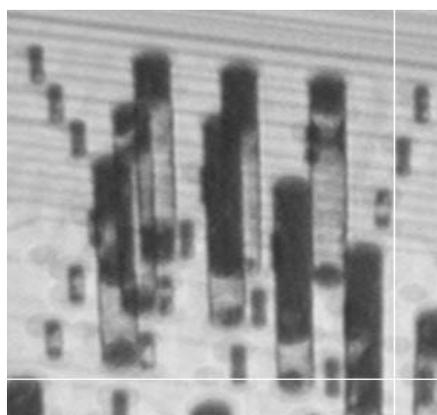


Рис. 10. Рентгеновский снимок:
Слева – результат ручного заполнения;
Справа – результат заполнения оборудованием.
Метод заполнения через шаблон

5.2. Роликовое заполнение («Rollercoating»)

Данный метод так же используется только для заполнения отверстий не проводящими материалами. Для этого метода уже создано довольно сложное оборудование. Эта технология была разработана в 1998 году в США, но еще до сих пор полностью не введена ни в одном предприятии как основное.

Сущность метода:

Установка ПП между валками

На край печатной платы фиксируют специальную пленку, посредством которой будет равномерно передаваться давление заполняющей пасты. После этого ПП устанавливается между валками.

Запрессовка пасты в отверстия

Между ПП и пленкой подают заполняющую пасту. Проходя между валками паста вдавливается в отверстия а излишки выравниваются по поверхности

Снятие Пленки и удаление излишков пасты

после снятия пленки ракелем с твердым наконечником снимают излишки пасты

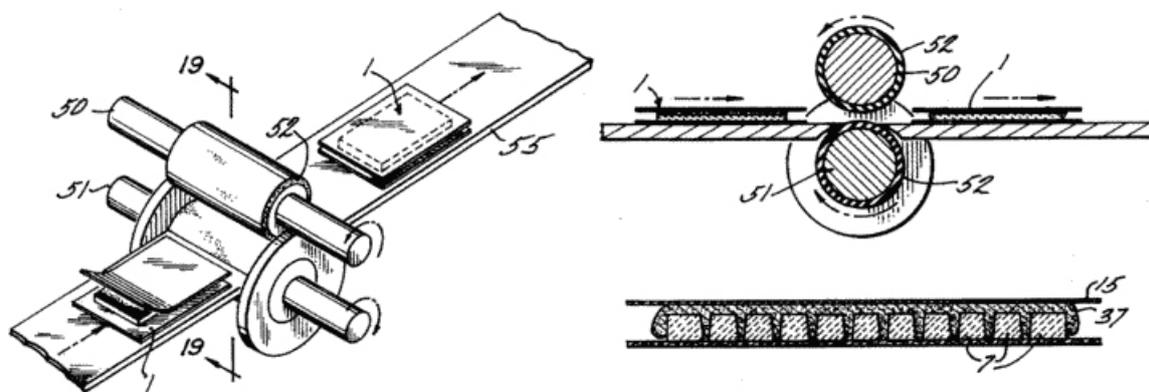


Рис. 11. Схема процесса:

1 - Установка ПП между валками, 2 - запрессовка пасты заполнителя в отверстия

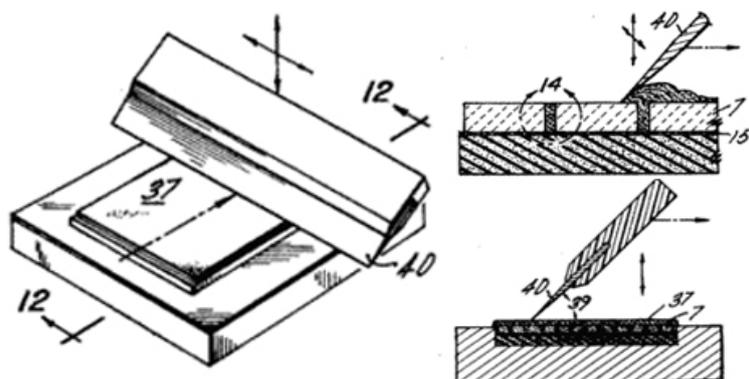


Рис. 12. Удаление излишек пасты с помощью ракеля с твердым наконечником

Преимущества метода роликового заполнения:

- Скорость заполнения отверстий (отверстия всей платы могут быть заполнены за 40...50 секунд);
- Не требуется шаблонов;
- Минимум контролируемых параметров процесса (Давление запрессовки – p , скорость вращения валков – n).

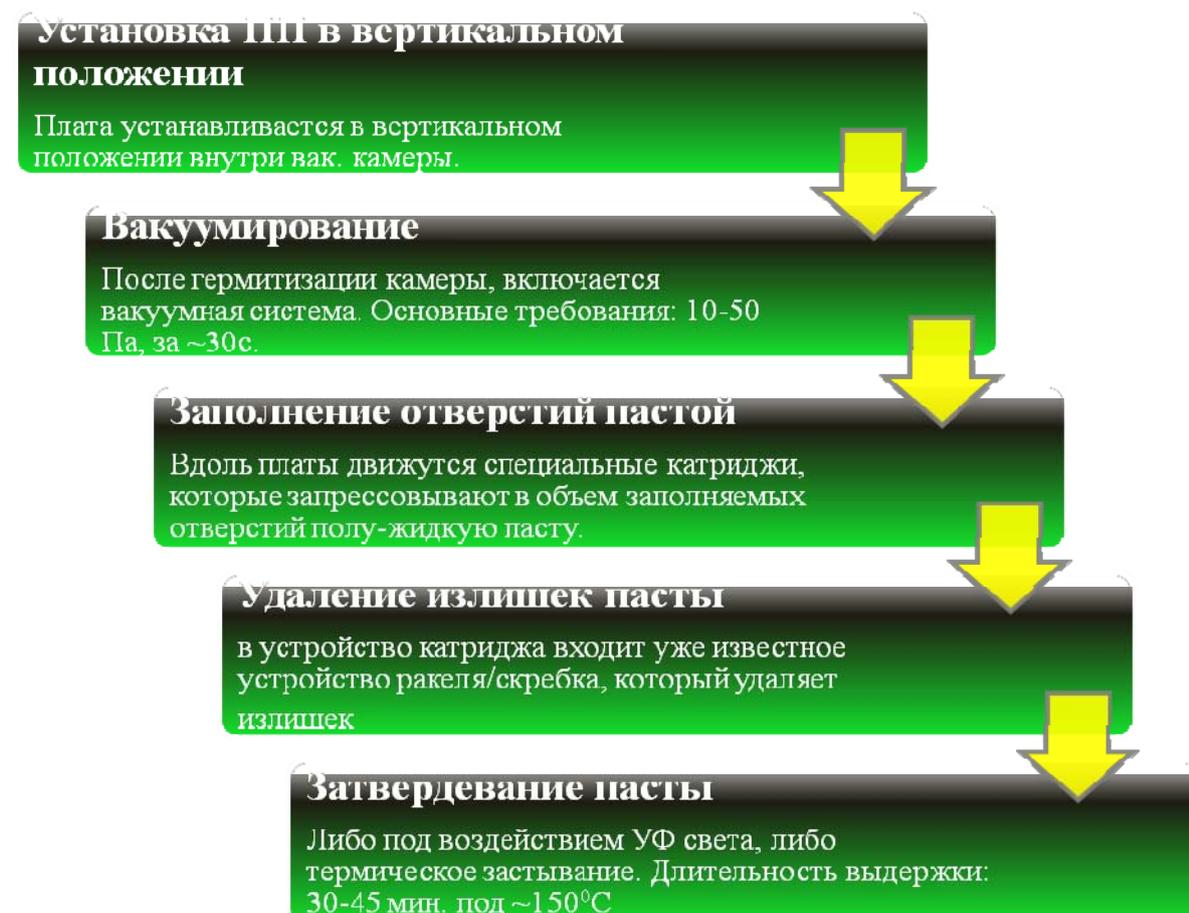
Недостатки метода роликового заполнения:

- Отверстия, которые нужно оставить незаполненными необходимо маскировать;
- Средний процент заполнения отверстия (~70...80%);
- Требуется приложить довольно большое усилие на ПП: 8...10 кг/см²
- Сильная зависимость всего процесса от состава и качества пасты;
- Необходимость специального оборудования.

5.3. Вакуумное заполнение («Vacuum Plugging»)

Данный метод незаменим, если необходимо заполнить отверстия с большим соотношением сторон. Для него необходимо специальное, довольно дорогостоящее оборудование, но качество заполнения отверстий оправдывает эту цену.

Сущность метода:



Установка платы в вертикальном положении связана с тем, что заполняемая паста должна обладать хорошей текучестью, и поэтому паста находится в практически жидком состоянии.

Немецкой фирмой MASS GmbH, уже разработана производственная версия установки вакуумного заполнения отверстий. Общий вид, и конструкция картриджа представлена на рис. 13.

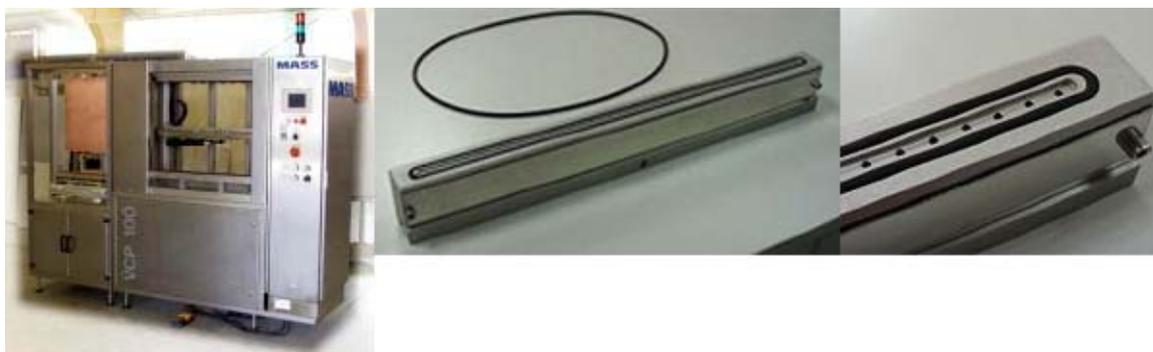


Рис. 13. Слева - Общий вид немецкой установки «MASSGmbHVia-HoleFillingSystem», справа – картридж

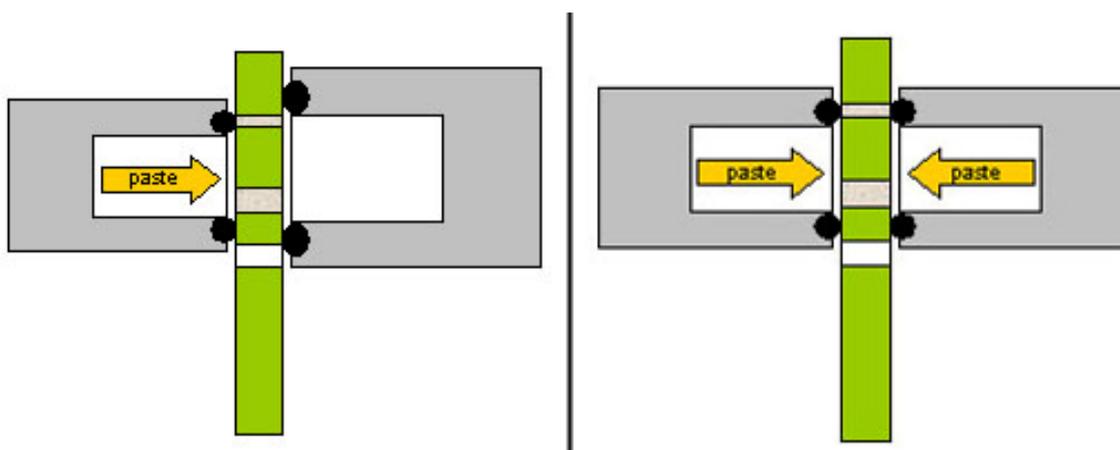


Рис. 14. Принципиальная схема заполнения отверстий вакуумным способом. Справа показан случай при заполнении отверстий с большим соотношением сторон

Преимущества вакуумного заполнения:

- Качество заполнения отверстия: процент заполнения $>95\%$;
- Возможность управления процессом рядом параметров, для получения оптимального качества заполненного отверстия;
- ППП не подвергается механическому воздействию;
- Возможность повторногоперезаполнения отверстий;
- Заполнение отверстий с большим соотношением сторон;
- Заполнение как проводящим, так и не проводящим материалом.

Недостатки вакуумного заполнения:

- Необходимость специального оборудования;
- Рабочее время заполнения ~ 1 час;
- Отверстия, которые необходимо оставить незаполненными, должны быть маскированы;
- Сильная зависимость качества заполнения от этапа затвердевания

5.4. Вакуумно-шаблонное заполнение. («VacuumTableAssist»)

Этот метод является комбинацией методов заполнения через шаблон и вакуумного заполнения. Для этого метода так же уже разработано оборудование. Качество заполнения отверстий хоть и уступает вакуумному заполнению, но зато этот метод лишен некоторых важных недостатков из-за которых вакуумное нанесение часто считают нетехнологичным.

Сущность метода такая же, как и у метода заполнения через шаблон за исключением одного.

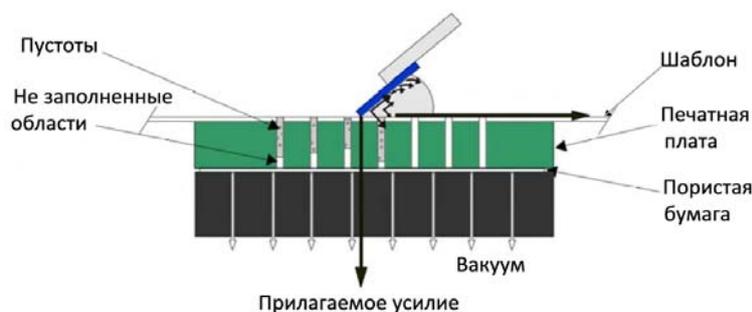


Рис. 15. Схема заполнения отверстий Вакуумно-шаблонным методом

Как видно из рис. 15, главное отличие этого метода от шаблонного заполнения в использовании предварительного вакуумирования отверстий перед заполнением. Это отличие устраняет один из главных недостатков многих методов – газовые включения в заполненном отверстии, о которых говорилось в пункте 4 данной работы. Следует отметить, что, как и в этом методе, так и в вакуумном заполнении отверстий, газовые включения («airvoids») в заполненных отверстиях все же есть, из-за содержащегося в пасте растворенного воздуха, таких же газовых включений внутри пасты, но их количество незначительно влияет на свойства заполненного отверстия.

На рис. 16 представлена принципиальная схема разработанной установки заполнения отверстий рассматриваемым методом.

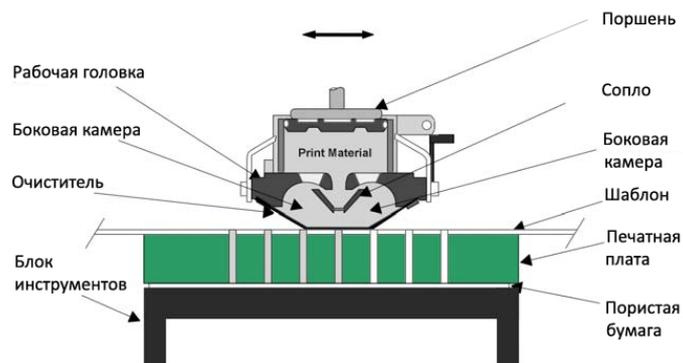


Рис. 16. Принципиальная схема установки шаблонно-вакуумного заполнения

Преимущества вакуумно-шаблонного заполнения:

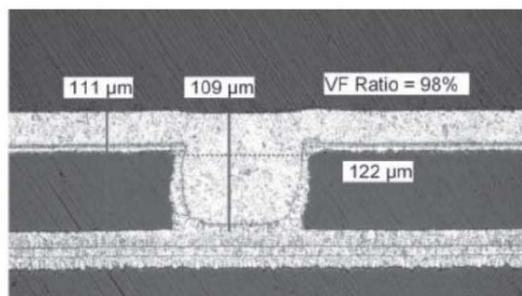
- Качество заполнения отверстия: процент заполнения 80...90%;
- Быстрое заполнение отверстий (производительность выше представленной установки 60 плат/ч.);

Недостатки вакуумно-шаблонного заполнения:

- Необходимость использования шаблона для каждого слоя заполняемых отверстий;
- Необходимость сложного технологического оборудования;
- сильная зависимость от качества и состава заполнителя.

5.5. Заполнение осаждением меди («Copperplatingfilling»)

Этот метод, наверное, единственный из всех, который уже в настоящее время внедрен в производство МПП требующих заполнения отверстий. По крайней мере, по данным 2010 года. Технология его хорошо изучена и создано много модификаций этого метода.



Все модификации метода можно разделить на два вида, с контролируемым электрохимическим осаждением меди и без управления химическим осаждением меди. Но, тем не менее, сущность метода одна.

Сущность метода:

Подготовленные глухие («*blind*») отверстия выполняют, как правило, конусообразными, с углом наклона от 0 до 15°. Сам метод очень схож с популярной технологией создания микропереходов между двумя внутренними слоями МПП. С той лишь разницей, что эти отверстия во внешнем слое и их необходимо заполнить полностью.

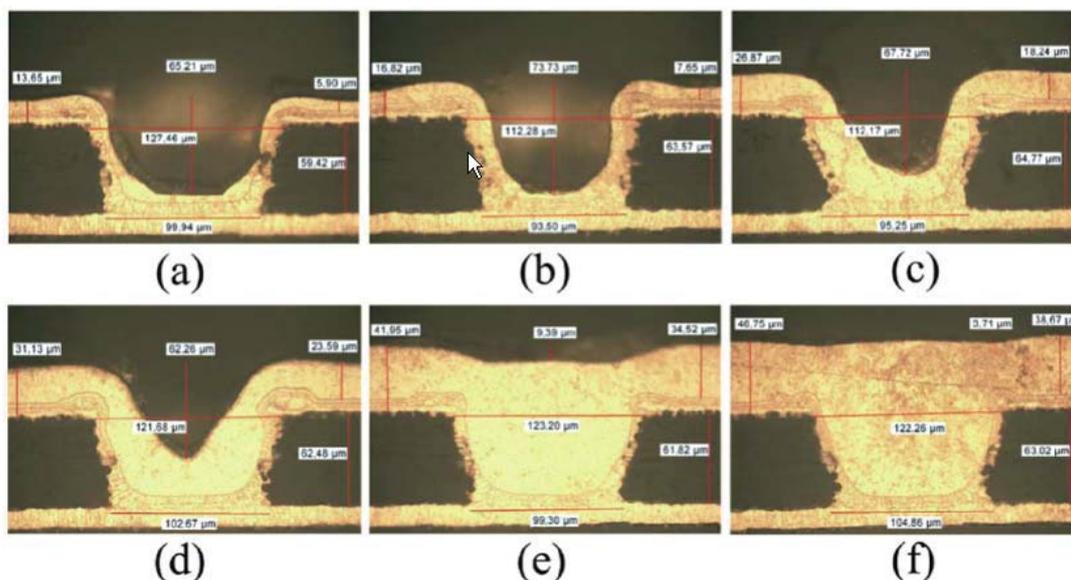


Рис. 17. Поперечное сечение отверстий после:
a -15; *b* -30; *c* - 45; *d* - 60; *e* -75; *f* - 90 минут

Заполнение происходит электрохимическим осаждением меди, на рис. 17 представлены стадии заполнения отверстия таким методом без контролирования процесса электрохимического осаждения меди.

Как видно из рис. 17, по мере заполнения отверстия растет так же и толщина медного слоя на поверхности. Это крайне нежелательный эффект, поэтому чтобы его избежать было разработано управляемое электрохимическое осаждение меди.

Управление электрохимическим осаждением меди довольно сложный физико-химический процесс, вдаваясь в подробности которого, можно написать немало книг. Поэтому в рамках данной работы рассматривать этот вопрос подробно не будем.

Преимущества заполнения отверстий осаждением меди:

- Качество заполнения отверстий: процент заполнения до 100%, зависит только от времени осаждения меди;
- Плата не подвергается механическому воздействию;

Недостатки заполнения отверстий осаждением меди:

- Длительное время заполнения (от 75...120 минут в зависимости от диаметра и длины отверстия);
- Заполнение отверстий с соотношением сторон ~1;
- Сложное физико-химическое управление процессом осаждения меди.

6. Заполнение отверстий методом вытеснения при прессовании

Все ранее рассмотренные решения были предложены за границей, иностранными компаниями, инженерами. И, конечно же, они уже далеко продвинулись в реализации представленных технологий. Для того чтобы не отстать и в этой гонке технологий, необходимо предложить свою технологию которая будет конкурентоспособной причем сделать это надо за ближайшее время.

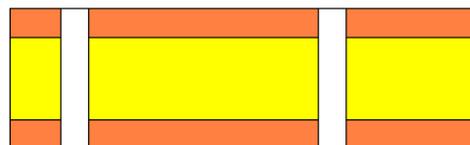
Ниже представлена технология, предложенная русским инженером Павловым. Не смотря на простоту метода, качество заполнения отверстий ожидается крайне высоким.

Сущность метода:

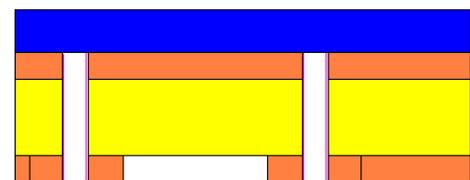
Заготовка представляет собой основание одного слоя ПП металлизированное с двух сторон как представлено на рисунке справа:



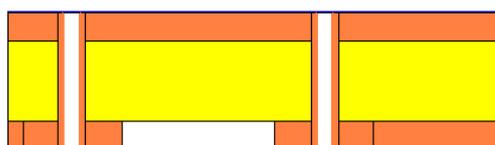
1. Сверление 1-го уровня, которые будут играть роль переходных отверстий с первого слоя на второй.



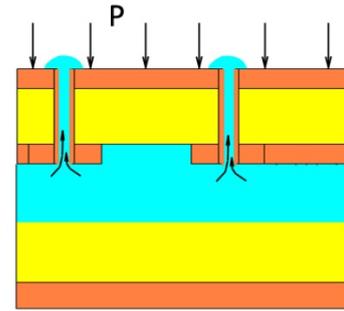
2. Химическое омеднение отверстий, нанесение фоторезиста (с обеих сторон), экспонирование, проявление – печать нижнего слоя, при защищенном полностью засвеченном верхнем слое.



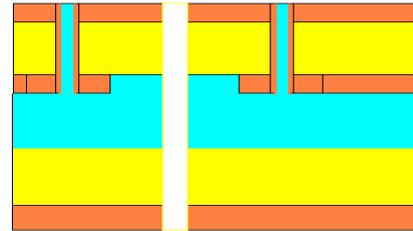
3. Гальваническое меднение отверстий, снятие слоя защиты.



4. Прессование промежуточного установочного слоя. На этом этапе под действием давления пресса склеивающий материал (препрег) переходит в текучее состояние (хорошо знакомая операция прессования) и вытесняется в подготовленные отверстия, вытесняя воздух изнутри и образуя заполненные отверстия по всей плате.



5. Удаление излишек вытесненной пасты, сверление отверстий второго уровня (т.е. с 1-го на 3-ий слой).



Далее повторяются этапы 1-4, до получения необходимого количества слоев.

Преимущества заполнения отверстий методом вытеснения при прессовании:

- Нет необходимости в специальном оборудовании: используется только широко используемое оборудование необходимое для производства МПП;

Это преимущество очень важно, поскольку благодаря этому внедрение в производство этой технологии может произойти в крайне сжатые сроки: не будет необходимости ни разрабатывать, ни покупать сложное дорогостоящее оборудование, обучать персонал управлению новыми установками или совершенно новыми технологическими операциями, переоборудовать уже имеющиеся автоматические линии производства печатных плат.

- Отсутствие погрешностей рассовмещения слоев многослойной печатной платы;

Каждый последующий внутренний слой МПП выполняется относительно первого, внешнего слоя.

- Высокое качество заполнения отверстий: процент заполнения $>95\%$; При использовании уже набирающих сейчас популярность вакуумных прессов качество заполнения можно повысить более чем до 98% (по теоретическим оценкам);
- Заполнение отверстий сразу по всей плате, не зависимо от их количества;
- Скорость заполнения (отсутствие специальных дополнительных операций заполнения);
- Не нужно разрабатывать/изготавливать специальные пасты-заполнители;
- не нужно проектировать контактные площадки для отверстий на внешнем слое;

Недостатки заполнения отверстий методом вытеснения при прессовании:

- Заполнение только непроводящими материалами;
- Заполнение всех отверстий, нет возможности маскировать отверстия которые не нужно заполнять;
- Нет возможности создания переходных отверстий с одного внутреннего слоя на другой внутренний слой, приходится связываться все слои через первый;

- Нельзя делать отверстия одно над другим;
- При сравнении процесса изготовления МПП, не содержащей сложных технологических переходов (микروпереходы, слепые отверстия) – которые изготавливаются прессованием полного пакета слоев, создание МПП с заполненными отверстиями методом вытеснения при прессовании содержит большее число технологических операций;
- Усложняется процесс проектирования.

Следует отметить, что изменится методика расчета толщины межслойного склеивающего материала, так как надо учитывать выдавливаемый объем этого склеивающего межслойного материала в заполняемые отверстия (учитывая их количество), выход его в облой, в качестве удаляемых излишек.

7. Разработка тестовой печатной платы

7.1. Цели тестирования

Тестирование или иначе испытания разработанной печатной платы, будут проводиться с целью подтверждения надежности предлагаемой технологии заполнения отверстий, применимости ее на практике, и вследствие ее очевидных преимуществ над остальными методами, будущего внедрения рассматриваемого способа заполнения отверстий в производство.

Основной способ тестирования, которому будет подвержена печатная плата это ручной метод электрического контроля при внешних термических воздействиях – как высоких, так и низких температур.

7.2. Выбор компонентов

Выбор компонентов обусловлен тем, что основная цель использования заполненных отверстий в повышении степени интеграции, при использовании многовыводных с мелким шагом компонентов для производства прецизионных (HDI) ПП. Поэтому абсолютное большинство компонентов, использованных при проектировании – компоненты типа QFP и типа BGA с шагом выводов от 0.5 до 1.0 мм. Также на плате размещены отдельные цепи с пассивными компонентами: резисторы 0201, 0402 и 0603.

7.3. Особенности проектирования тестовой ПП

1. Проектирование отверстий внутри контактных площадок («*via-in-pad*»);
2. Размещение нескольких отверстий в пределах одной контактной площадки компонента;
3. Повышенная плотность размещения компонентов печатной платы, расстояние между компонентами – 3 мм.
4. Проектирование с учетом особенностей рассматриваемой технологии заполнения отверстий, в частности, невозможности создания отверстий друг над другом и использования переходов с одного внутреннего уровня на другой;
5. Количество отверстий малого диаметра (> 25 000 шт.);
6. Наличие ограничивающих технологических полей (из-за предусмотренных областей крепления платы и особенностей компонентов с матричным расположением выводов – предъявляемые требования плоскостности запрещают размещение BGA компонентов в областях наибольшего изгиба).

7.4. Методика трассировки компонентов для тестируемой печатной платы

В ходе разработки тестовой печатной платы необходимо было разработать методику трассировки компонентов, на основании алгоритмов трассировки крупных компаний производящих специальные тестовые печатные платы для исследований новых технологических приемов, внедряемых в то или иное производство.

Такиими компаниями являются: «*TopLine Corporation*» (США), «*Practical Components, Inc.*»(США).

Главное отличие разработанной в данной работе методики трассировки компонента от методик этих компаний в том, что трассировка происходит во внутренних слоях многослойной печатной платы, а не внутри компонента. Это связано в первую очередь с тем, что цель тестирования – проверка надежности соединения, надежность заполненных переходных отверстий, а не контроль монтажа самих компонентов.

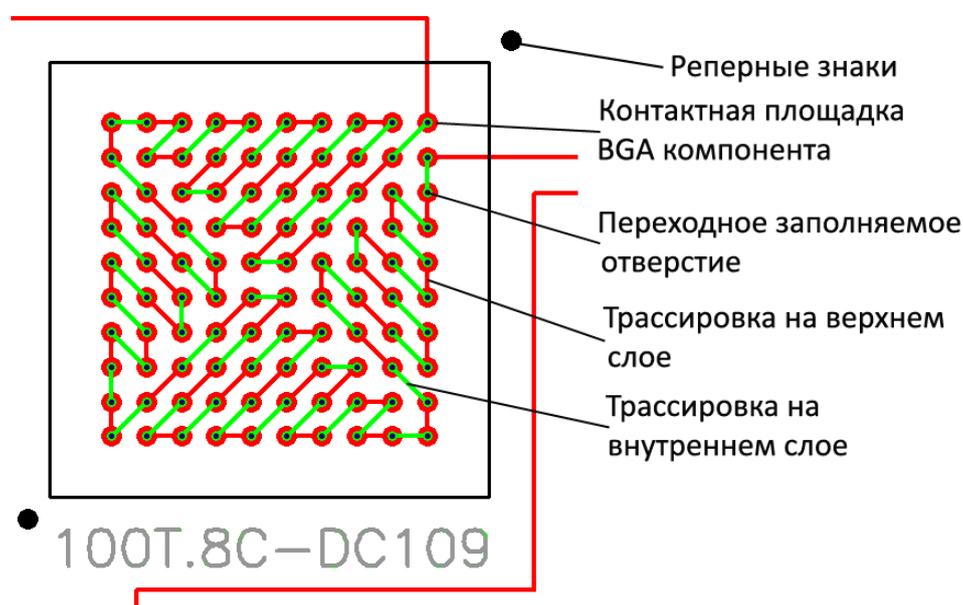


Рис. 18. Методика трассировки BGA компонента тестовой печатной платы

В разработанной печатной плате реализовано 5 тестовых цепей, выходы которых выведены для удобства в левый нижний угол. Со стороны с преимущественным большинством QFP компонентов, реализовано 2 цепи, а со стороны с преимущественным большинством BGA компонентов – 3 цепи.

7.5. Общие характеристики тестовой платы

- 5 класс точности:
 - Ширина печатного проводника: 0.1 мм;
 - Расстояние между соседними элементами проводящего рисунка: 0.1мм;
 - гарантированный поясок: 0.025 мм.
- 12 слоев;
- Габариты платы: 220x160 мм.

7.6. Общий вид спроектированной тестовой печатной платы

8. Прогнозы и ожидаемые результаты тестирования

В случае положительных результатов тестирования разработанной печатной платы, можно будет сделать вывод о надежности создания заполненных переходных отверстий, выполненным новым методом, предлагаемым в данной работе.

Сверление отверстий малого диаметра для данной печатной платы является наиболее сложным, длительным и влияющим на работоспособность всей платы процессом. Длительность этого этапа при ориентировочной скорости сверления 2 отв./с, составляет ~3,5 часа. Напомним, диаметр этих отверстий 0.1 мм. Ожидается большой износ, и возможно поломка инструмента в процессе сверления, поэтому необходим тщательный контроль над проведением этого этапа.

Дальнейшее развитие рассматриваемой в данной работе новой технологии, будет заключаться в разработке методик конструирования печатных плат с заполняемыми отверстиями методом вытеснения при прессовании, поскольку при проектировании таких плат необходимо несколько изменить порядок мыслей инженера-разработчика, ввиду особенностей, рассмотренных в пункте 7.

Для производственной реализации данной технологии нет необходимости в разработке нового оборудования, но все же необходимо разработать программное обеспечение, с помощью которого на автоматических линиях будет возможно управлять процессом производства многослойных печатных плат по этой технологии. Также должны быть адаптированы расчеты толщин межслойных расстояний клеящего материала, о чем уже упоминалось в конце пункта 6.

Если делать более далекий прогноз, то ввиду того, что данный метод обладает чрезмерной гибкостью, легкостью и простотой внедрения в существующие производственные линии, дешевизной и в то же время качеством получаемых заполненных отверстий, он будет довольно быстро внедрен во многих российских и наверняка иностранных предприятиях по производству печатных плат. Станет практически основным методом создания заполненных отверстий.

В случае отрицательных результатов теста, необходимо будет в первую очередь проверить качество сверления и правильность проектирования самой тестовой печатной платы.

9. Заключение

Преимущества заполненных отверстий очевидны и использование их в производстве многослойных печатных плат растет год от года. Благодаря заполненным отверстиям повышается эффективность использования полезной площади, повышается коэффициент трассировки и отпадает необходимость создания большого числа слоев для трассировки многовыводных матричных компонентов с мелким шагом (количество требуемых внутренних слоев для трассировки уменьшается в 2...3 раза).

За последнее десятилетие разработка технологий заполнения отверстий стала настоящей гонкой в области производства печатных плат. И конечно же все наработки иностранных компаний в этой области уводит их далеко вперед, но благодаря рассматриваемой в данной работе технологии все методы, которые были предложены до этого останутся позади, ввиду его очевидных преимуществ над остальными.

Сравнительный анализ рассмотренных в данной работе технологий заполнения переходных отверстий представлен в табл. 1.

Табл. 1. Сравнительный анализ технологий заполнения отверстий

Сравниваемая технология \ Характеристика	Шаблонное заполнение 5.1.	Роликовое заполнен. 5.2.	Вакуумное заполнен. 5.3.	Вакуумно-шаблонное 5.4.	Осаждением меди 5.5.	Вытеснением 6.
Качество заполнения отверстий, %	60-80	70-80	>95	80...90	>95	>95
Отсутствие необходимости в спец. оборудовании	+	-	-	-	+	+
Производительность, слоев/час	10...20	20...30	1...2	40...60	0.5	2...4
Заполнение отверстий с большим соотношением сторон	-	-	+	+/-	-	+
Заполнение отверстий с $d < 150$ мкм	-	+/-	+	+	+	+
Отсутствие межслойных рассовмещений	-	-	-	-	+/-	+

Литература

1. «РосБизнесКонсалтинг» - Аналитический обзор «Российский рынок печатных плат». Москва, 2011г.
2. Тахаутдинов Р.Ш. – «Многослойные печатные платы. Первые шаги в освоении операции прессования». Журнал, «Технологии в электронной промышленности» №3, 2010г.
3. Michael Carano, Electromechanicals Inc., Minnesota – «Via Hole Filling Technology for High Density, High Aspect Ratio Printed Wiring Boards Using a High Tg, low CTE Plugging Paste», 2007 г.
4. Michael O'Hanlon, DEK Printing Machines, Flemington - «Process for Plugging Low to High Aspect Ratio Through-Holes with Polymer Thick Film Conductive Ink in Production Volumes», 2004 г.
5. Adam Singer, Guillermo Echeverria, Prashant Chouta, Eric Stafstrom, A. James McLenaghan, Cookson Electronics, Foxboro - «The Effect of via-in-pad via-fill on solder joint void formation», 2003 г.
6. John Steinar-Johnsen - «Filled, Plugged, Plated Via-In-Pad», 2010г.
7. IPC-4761 - «Design guide for protection of Printed board, Via structures», 2006 г.
8. Practical Components - «Boards and Kits Practical Dummy Components Catalog», 2004 г.
9. Пивненко В. - «Реперные знаки как неотъемлемый элемент успешного дизайна печатных плат», 2007 г.
10. Лузин С., Петросян Г., Полубасов О. - «Проблемы трассировки печатных плат с BGA-компонентами», ChipNews 2008 г.
11. Потапов Ю. Проектируем платы с BGA-компонентами, EDAExpert, 2002г.
12. Прилипко К. – «Проектирование многослойных печатных плат высокой плотности», 2009г.
13. Patent application title: «METHOD OF FILLING VIAS WITH FUSIBLE METAL», Jaroslaw A. Magera (Palatine, IL, US) Bruce C. Deemer (Crystal Lake, IL, US) , Publication date: 09/03/2009.
14. Franklin; Mark Andrew, Jabbour; Georgina Marie, Baker; James Carl, «System and method for filling vias» Patent № 7781311, 2006 г.

УДК 539.1

ВАКУУМНАЯ АВТОМАТИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ ДЛЯ ОБОГАЩЕНИЯ НАНОСТРУКТУР ШИРОКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ИЗОТОПАМИ ВОДОРОДА

Роман Олегович Емельяненко

*Студент 5 курса,
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Е.А. Деулин,
доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные технологии в
машиностроении»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Работа посвящена расчету энергетической эффективности обогащения наноструктур широкого применения изотопами водорода. И обоснованию экономической целесообразности данного метода на базе вакуумной автоматической линии для обогащения наноструктур широкого применения изотопами водорода.

Обогащение наноструктур широкого применения водородом происходит путем механического измельчения (истирания) исходных элементов сырья органического происхождения до получения наноразмера в 100 нм (характеризующего радиус описанной окружности наночастицы в соответствии с ГОСТ Р 8.698-2010) и их последующего смешивания с жидкостью-носителем до образования гомогенной смеси.[1]

Рассмотрим каменный уголь в качестве сырья и этиловый спирт в качестве жидкости носителя, уже используемый, как топливо в чистом виде [2].

Расчет энергетической эффективности:

Количество атомов углерода С в 1 кг угля определяется по формуле:

$$N_C = \frac{1}{m_{\text{атом С}}} = \frac{1 \text{ кг}}{1.993 \cdot 10^{-26} \text{ кг}} = 5.017 \cdot 10^{25} \text{ атомов}$$

где: $m_{\text{атом С}} = 1.993 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$ - масса одного атома С [3]

Суммарную массу атомов водорода, проникших в уголь при наводораживании мы можем рассчитать, зная суммарное количество атомов водорода, проникших в уголь при его истирании, по формуле:

$$\Delta m = N_H \cdot m_H = 2.508 \cdot 10^{25} \cdot 1.674 \cdot 10^{-27} = 0.041 \text{ кг} = 41 \text{ г}$$

где: $m_{\text{атом Н}} = 1.674 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ [3] - масса одного атома Н.

$N_H = 2.508 \cdot 10^{25} \text{ атомов}$ - суммарное количество атомов водорода, проникших в уголь при его истирании, которое рассчитывается на основании известных нам законов распределения концентрации атомов Н после трения [1].

Зная суммарную массу проникших в полученные частицы угля атомов водорода, можно определить массу угля, после его истирания, т. е. массу обогащенных наноструктурированных частиц, по формуле:

$$M_{T(\text{сухое нанотоплив})} = m + \Delta m = 1 \text{ кг} + 0.041 \text{ кг} = 1.041 \text{ кг}$$

Расчет удельной теплотворной способности полученного путём истирания сухого нанотоплива, подставив найденные выше и табличные значения, можно произвести по формуле:

$$A_{T(\text{сухое нанотопливо})} = \frac{A_C \cdot m + A_H \cdot \Delta m}{M_{T(\text{сухое нанотопливо})}} = \frac{29.3 \cdot 10^6 \cdot 1 + 140.9 \cdot 10^6 \cdot 0.041}{1.041} = 33.69 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$$

где $A_C = 29.3 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$ - удельная теплотворность каменного угля [3],

$A_H = 140.9 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$ - удельная теплотворность водорода [3].

Таким образом, удельная теплотворность полученного продукта- угля повышена от исходного значения $29.3 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$ до $33.69 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$, т. е. **на 13.05%**, что свидетельствует об энергетической эффективности нанотоплива.

Получение жидкого наноструктурированного топлива требует приготовления суспензии, на основе этилового спирта, имеющей следующие пропорции:

$$\frac{M_{T(\text{сухое нанотопливо})}}{m_{C_2H_5OH}} = \frac{32\%}{68\%}, \Rightarrow m_{C_2H_5OH} = 2.212 \text{ кг}$$

Расчет удельной теплотворной способности, полученной суспензии (жидкого нанотоплива), следует производить по формуле:

$$A_{T(\text{жидкое нанотопливо})} = \frac{A_{T(\text{сухое нанотопливо})} \cdot M_{T(\text{сухое нанотопливо})} + A_{C_2H_5OH} \cdot m_{C_2H_5OH}}{M_{T(\text{сухое нанотопливо})} + m_{C_2H_5OH}} = \frac{33.69 \cdot 10^6 \cdot 1.041 + 30 \cdot 10^6 \cdot 2.212}{1.041 + 2.212} =$$

$$31.18 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$$

где $A_{C_2H_5OH} = 30 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$ - удельная теплотворность этилового спирта [3].

Теплотворная способность жидкого наноструктурированного больше теплотворной способности этилового спирта на **3.8%**.

Приведённый расчёт показывает, что теплотворная способность жидкого наноструктурированного больше теплотворной способности этилового спирта на **3.8%**.

Обоснование экономической целесообразности:

Для обоснования экономической целесообразности необходимо рассчитать себестоимость обогащенных наноструктур и сравнить себестоимости исходных структур и обогащенных. Если повышение себестоимости не будет превышать повышение энергетической эффективности, то можно будет сделать вывод о целесообразности метода обогащения наноструктур изотопами водорода.

Получение и обогащение наноструктур будем производить с помощью шаровой мельницы МШ-1, (рис. 1.). В табл. 1 приведены технические характеристики данной мельницы.



Рис. 1. Мельница шаровая непрерывного действия МШ-1

Табл. 1. Характеристики мельницы шаровой МШ-1

Внутренний диаметр барабана, мм	700
Длина барабана, мм	550
Скорость вращения барабана, об./мин	41
Размер исходной фракции для размола, мм	до 20
Номинальная производительность, кг/час	250
Установленная мощность, кВт	5.5
Масса, кг	1700
Габаритные размеры, мм	2600x1300x1320
С площадкой обслуживания, мм	2660x2490x2095
Масса, кг	2300
в том числе: шаровая загрузка	180
Ресурс, лет	5
Стоимость, руб.	121 800

Сырьем выбран каменный уголь марки ДОМ, конечный продукт будет получен в виде угольных наноструктур, которые будут обогащены изотопами водорода.

Затраты на электроэнергию рассчитываются, учитывая мощность, которая потребляется установкой в час, и стоимость кВт/час по городскому тарифу в г. Москва.

Заработная плата оператора технологического процесса, рассчитывается по формуле:

$$P \geq 1.5 \cdot \text{Пр}_{\min},$$

где Пр_{\min} – прожиточный минимум (9 188 руб. за III квартал 2011 года)

Амортизация установки рассчитывается исходя из стоимости установки и ресурса её работы.

Так как производительность установки составляет 250 кг/час, то затраты (себестоимость S) на изготовление 250 кг обогащенных наноструктурированных частиц за час составят:

1. Эл. энергия (E) – 5.5 кВт./час. * 4 руб./кВт = 22 руб./час.
2. Сырьё (R) – каменный уголь марки ДОМ 3514 руб./т, или 878.5 руб./час.
3. Зарплата (P) – 1 оператора на установке 15 т. р./мес., или 93.75 руб./час.
4. Амортизация установки «Шаровая мельница» (D) (ресурс 5 лет работы) - 121 800руб./43 800час = 2.78 руб./час

$$S = E + R + P + D = 22 + 878.5 + 93.75 + 2.78 = 997.03 \text{ руб./час}$$

Теперь найдем себестоимость 1 кг обогащенных наноструктурированных частиц:

$$Cб_{\cdot \text{НАНО}} = \frac{S}{250} = \frac{997.03}{250} = 3.98 \text{ руб./кг}$$

Чтобы сравнить себестоимости исходных структур и обогащенных, нужно себестоимость 1 кг каменного угля ($Cб_{\cdot \text{УГЛЯ}} = 3.51 \text{ руб./кг}$) соотнести с себестоимостью наноструктур:

$$\omega = \frac{(Cб_{\cdot \text{НАНО}} - Cб_{\cdot \text{УГЛЯ}})}{Cб_{\cdot \text{УГЛЯ}}} \cdot 100\% = \frac{(3.98 - 3.51)}{3.51} \cdot 100\% = 13\%$$

Так как повышение теплотворной способности топлива происходит не менее, чем на $\eta = 13.05\%$, а повышение себестоимости не превышает $\omega = 13\%$, то можно говорить об эффективности данного метода обогащения наноструктур изотопами водорода.

Выводы:

Проведённые расчёты показывают, что при реализации технологии получения наноструктурированного топлива реализуются следующие параметры:

- Теплотворная способность угля при структурировании повышается на **13.05%**.
- Теплотворная способность получаемого на промежуточном этапе сухого наноструктурированного топлива больше теплотворной способности этилового спирта на **10%**.

- Теплотворная способность получаемого на последней технологической стадии жидкого наноструктурированного топлива больше теплотворной способности этилового спирта на **3.8%**.

- Повышение себестоимости не превышает $\omega = 13\%$, то можно говорить об эффективности данного метода обогащения наноструктур изотопами водорода.

Литература

1. *Деулин Е. А.* Заявка на патент РФ №2010 137 824 от 13.09.2010 Способ получения наноструктурированного топлива.
2. *Wilfreid J. Bartz-Ostfildern.* Алкилированные нафталины как синтетическое топливо, с. 238-239.
3. *А. М. Прохоров.* Физическая энциклопедия. Большая Российская энциклопедия, 1998. —60-120 с.

УДК 621.382.323

ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ В МОП-ТРАНЗИСТОРАХ С НАНОМЕТРОВЫМИ РАЗМЕРАМИ ЭЛЕМЕНТОВ

Екатерина Вадимовна Одинокова

*Студентка 3 курса,
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Ю.Б. Цветков,
доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные технологии в
машиностроении»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Тенденции современного развития электроники требуют все большего уменьшения размеров микросхем, а значит, уменьшения размеров транзисторов, являющихся их основными элементами. Это обусловлено тем, что, во-первых, большее количество транзисторов на кристалле позволяет создать более многофункциональные и вместительные микросхемы, и, во-вторых, дает преимущество в «электрическом и энергетическом плане».

Одним из параметров миниатюризации транзисторов является толщина подзатворного диэлектрика. Она необходима для получения не только малых габаритов транзистора в целом, но и для его высочайшего быстродействия (заряженные частицы передвигаются быстрее через затвор, в результате чего такой МОП-транзистор может переключаться до 10 миллиардов раз в секунду). Другими словами, чем ближе затвор к

каналу транзистора (то есть, чем тоньше диэлектрик), тем «большее влияние» в плане быстрогодействия он будет оказывать на электроны и дырки в канале транзистора.

Но, к сожалению, уменьшение толщины подзатворного диэлектрика ведет к заметному росту паразитного тока утечки затвора (из-за туннелирования электронов сквозь слой диэлектрика, которое экспоненциально растет с уменьшением толщины после значения в 1 нм (рис. 1)). Ток утечки, учитывая число транзисторов на кристалле, значительно повышает потребление и тепловыделение микросхемы.

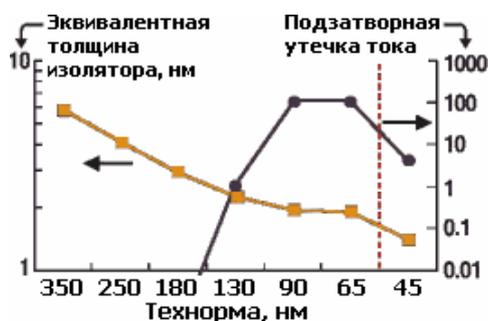


Рис. 1. График толщины подзатворного изолятора в SiO₂-эквиваленте и относительной утечки тока

На протяжении 30 лет в качестве материала для диэлектрика затвора использовался диоксид кремния, обладающего технологичностью и возможностью улучшать характеристики транзисторов по мере уменьшения их размеров. В новейших транзисторах толщина слоя диоксида кремния составляет всего 1,2 нм, то есть 5 атомарных слоев. Это предел – дальнейшее утоньшение приведет к существенному росту тока утечек и избыточному тепловыделению микросхемы в целом. По оценкам экспертов в современных чипах почти 40% энергии теряется из-за утечек.

Подзатворный оксид (*gate oxide*), можно смоделировать как параллельную пластину конденсатора, удельная емкость C которой, обратно пропорциональна толщине подзатворного диэлектрика d :

$$C = \frac{k\varepsilon_0 A}{t}$$

где k – показатель диэлектрической проницаемости;
 ε_0 – диэлектрическая константа;
 A – площадь конденсатора.

То есть, чем меньше толщина t и больше параметр k тем транзистор потенциально быстрее. И поскольку дальнейшее утоньшение существующего диэлектрика SiO₂ уже не представляется возможным, то требуется уделить внимание параметру k , другими словами, найти материал, у которого k больше чем у SiO₂.

Относительная диэлектрическая проницаемость k – безразмерная величина, разная для разных веществ, представляет собой отношение $k = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$, где ε –

диэлектрическая проницаемость материала, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, равная единице. Поскольку любой материал, по сравнению с вакуумом, способен поляризоваться, то у любого материала $k > 1$.

В микроэлектронике привычным значением k считается 3,9, что соответствует проницаемости диоксида кремния (SiO₂), десятилетия использовавшегося в качестве боковых, межслойных и подзатворных изоляторов. Вещества с проницаемостью выше

3,9 относятся к классу *high-k* (высокопроницаемые), а ниже — к *low-k* (низкопроницаемые).

Низкопроницаемые материалы (*low-k*) нужны для межслойных и боковых диэлектриков, для того, чтобы лучше изолировать металлические дорожки межслойных соединений, избегая диэлектрического пробоя из-за слишком тонкого слоя изоляции между ними. Такие соединения обладают малой способностью поляризоваться под действием электрического поля и удерживать заряд.

Но сама изоляция должна быть тонкой, поскольку иначе невозможно подвести дорожки к уменьшающимся транзисторам, кроме того как сделав такими же малыми и проводники, и разделяющие их изоляторы.

Материалы *low-k* (низкопроницаемые):

- фторосиликатное стекло (*Fluorine-doped silicon dioxide* (F, SiO₂)) $k = 3,5$;
- карбоносиликатное стекло (*Carbon-doped silicon dioxide* (C, SiO₂)) $k = 3,0$;
- пористый диоксид кремния (*Porous silicon dioxide*) $k \approx 2$. Различными методами возможно получить пустоты (поры) в SiO₂, при этом их диэлектрическая проницаемость примерно равна 1. Таким образом, можно получить материал с параметром k меньше 2;
- нанокластерный кварц (SiO₂) $k = 2,25$;
- органические полимеры $k < 2,2$;

По идее, изолятор, разделяющий затвор и канал транзистора, должен подчиняться этим же требованиям, но на деле оказывается всё наоборот — тут нужен как раз высокопроницаемый диэлектрик, способный хорошо держать заряд.

В качестве новых материалов для подзатворного диэлектрика и затвора в будущих поколениях транзисторов (для техпроцесса менее 90 нм) в микроэлектронике было предложено сокращение *HKMG* — *High-k [dielectric and] Metal Gate*, то есть изолятор с высокой диэлектрической проницаемостью и металлический затвор.

Материалы *high-k* класса :

- силикат гафния HfO₄Si;
- силикат циркония ZrSiO₄;
- оксид гафния HfO₂, оксид циркония ZrO₂;
- оксиднитрид кремния-гафния HfSiON.

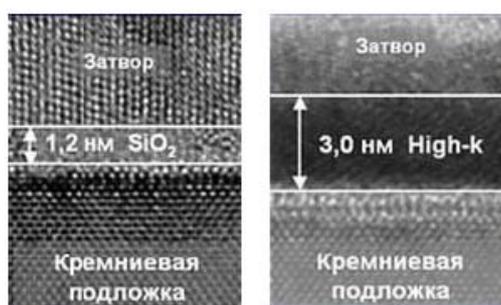


Рис. 2. Структура традиционного подзатворного диэлектрика (слева) и нового *high-k* диэлектрика (справа)

Высокопроницаемый диэлектрик позволяет электрическому полю затвора проникать на большую глубину или толщину, не снижая остальные электрические характеристики, влияющие на скорость переключения транзистора. При этом эти материалы могут иметь большую толщину, чем диоксид кремния, при сохранении тех

же свойств. Так что, заменив оксид кремния на новый оксинитрид кремния-гафния (HfSiON , $k = 20 \dots 40$) толщиной в 3 нм (рис. 2), для процесса 45 нм удалось уменьшить утечки тока в 20...1000 раз. Для получения такой же скорости работы старый затвор пришлось бы делать толщиной в 1 нм. Диоксид кремния применяется в виде нижнего подзатворного слоя, но используется только как физический интерфейс для совместимости с текущими техпроцессами.

Табл. 1. Преимущества *high-k* диэлектрика по сравнению с SiO_2

	<i>high-k</i> против SiO_2	Преимущество
Емкостное сопротивление	На 60% больше	Повышается быстродействие
Ток утечки	В 20-1000 раз меньше	Уменьшается тепловыделение

Но при замене диэлектрика (*high-k*) необходимо менять и материал затвора (*metal gate*) (рис. 3) – традиционный поликристаллический кремний на специальную комбинации металлов, из-за того, что дефекты на границе нового диэлектрика и поликремния затрудняют задание пороговых напряжений. Кроме того, наблюдается значительное снижение активности движения электронов через канал из-за возникновения так называемого поверхностно-оптического фонового режима и связанного с ним снижения эксплуатационных характеристик транзистора вследствие поляризации *high-k*-слоя и инверсии заряда материала канала.

Теперь ясно, почему эти две технологии идут парой. Однако новый затвор не алюминиевый, как это было в 60-х, а в виде сплава двух металлов. Его сопротивление ниже, что ускоряет переключение транзистора. Изначально было известно лишь то, что сплав отличается для р- и n-канальных транзисторов, причём компания *Intel*, которая первой всё это применила, держит оба состава в строгом секрете.

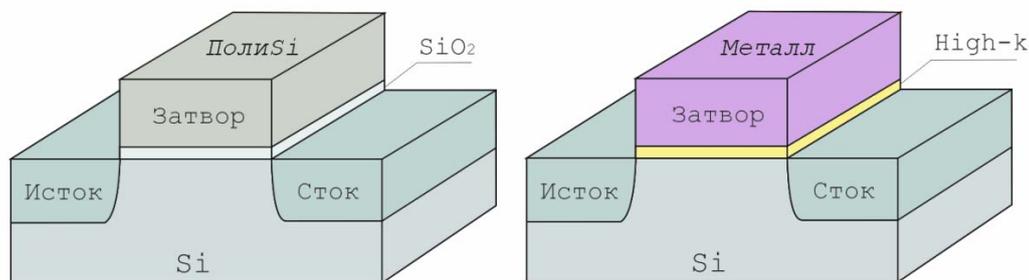


Рис. 3. Стандартный кремниевый транзистор (слева) и транзистор с изолятором с высокой диэлектрической проницаемостью и металлическим затвором (справа)

До сих пор использованию металлов мешал тот факт, что после имплантации примесей пластина проходит отжиг при температуре 900...1000 °С, что выше температуры плавления многих металлов (включая алюминий) и сплавов, но не поликремния. Хотя даже и без плавления при повышении температуры металл может диффундировать в подлежащие слои. Вот почему точная формула сплавов держится в секрете — сложно подобрать требуемый по свойству материал. Приходится применять всё более экзотические материалы — например, *Panasonic* легирует сплав для n-каналов своих *HKMG*-транзисторов редкоземельным элементом лантаном.

На данный момент в лабораторных условиях созданы высокоэффективные р- и n-типа транзисторы со стеками, полученными по технологии «*high-k*/металл» (рис. 4). Эти транзисторы обладают длиной затвора равной 80 нм и толщиной слоя диэлектрика примерно 1,4 нм. Транзисторы обоих типов показывают очень высокую эффективность при установке соответствующего порогового напряжения и имеют хорошую управляемость характеристик канала.

Следует отметить, что сочетание high-K-диэлектриков с металлическим материалом затвора — не единственное нововведение. В транзисторах нового поколения используется технология напряженного, или растянутого, кремния (*Strained Silicon Technology*) — (рис. 5). При миниатюризации транзисторов и уменьшении площади их сечения возрастает сопротивление электрическому току, который проходит через транзистор. В результате тепловыделение увеличивается, а транзистор «срабатывает» гораздо медленнее, чем хотелось бы.

Для решения данной проблемы применяется напряжённый кремний (*strained silicon*) — формируется слой кремния для канала, в котором расстояние между атомами (как минимум в направлении исток-сток) не равно естественному шагу кристаллической решётки (0,357 нм). Для большего шага сначала внедряется «посевной» слой кремния-германия SiGe (рис. 5). Кристалл германия имеет шаг атомов 0,357 нм (именно из-за большей подвижности носителей заряда его первым стали применять в электронике). Смешанный полупроводник сохраняет это значение, даже если доля германия всего 17% (это для 90 нм; а для 32 нм — уже 40%). Осаждаемые поверх атомы кремния межатомными силами крепятся к атомам широкой решётки и остаются с её шагом, формируя затвор. Разряжение атомов увеличивает подвижность электронов, что ускоряет транзистор на 20...30%.

Другими словами, кристаллическую решетку «растягивают» (рис. 5), чтобы увеличить расстояние между атомами и облегчить протекание тока (рис. 6).

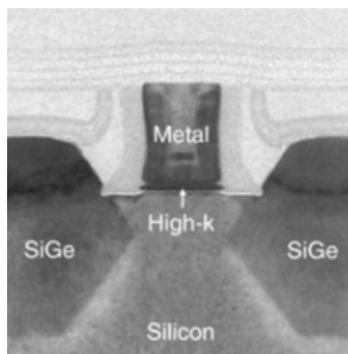


Рис. 4. Структура МОП-транзистора p-типа с *HKMG*

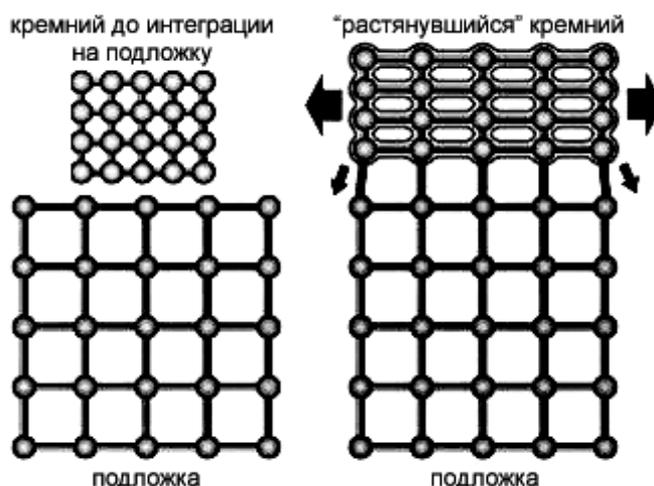


Рис. 5. Кремний до и после осаждения на кремний-германиевый слой

Создание напряжений в пространственной решетке — таких, чтобы атомы кремния находились друг от друга на расстоянии чуть большем, чем их естественное расстояние, — приводит к ускорению переключений транзисторов *n*-типа (так же, как сжатие пространственной решетки приводит к аналогичному эффекту для транзисторов *p*-типа). Это «растяжение/сжатие» именуют напряжением.



Рис. 6. Путь электрона сквозь обычный и напряженный кремний

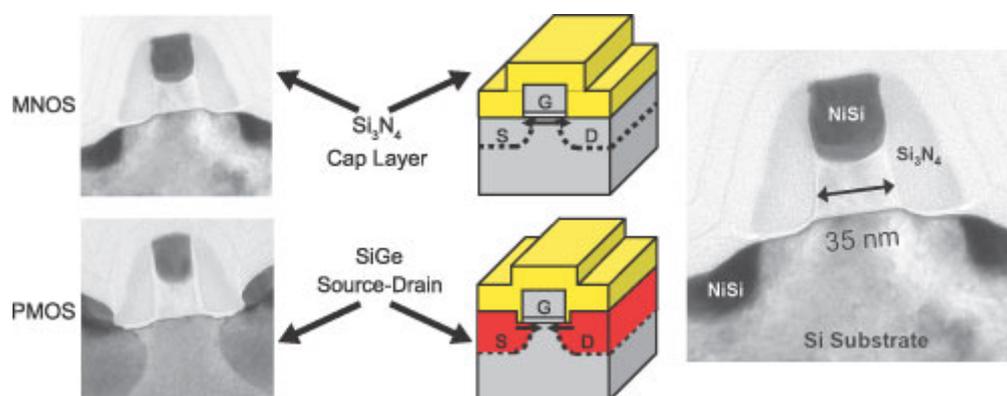


Рис. 7. Технология напряженного кремния: транзистор *n*-типа(сверху) и транзистор *p*-типа(снизу)

В транзисторах *n*-типа (рис. 7) поверх транзистора в направлении движения электрического тока наносится слой нитрида кремния (Si_3N_4), вследствие чего кремниевая кристаллическая решетка «растягивается». В устройствах *p*-типа (рис. 7) это достигается за счет нанесения слоя SiGe в зоне образования переносчиков тока — здесь решетка «сжимается» в направлении движения электрического тока, а потому «дырочный» ток течет свободнее. В обоих случаях прохождение тока значительно облегчается: в первом случае — на 10 %, во втором — на 25 %, а соединение обеих технологий дает 20...30%-ное ускорение тока.

Подводя итог, можно сказать, что для дальнейшего продвижения по пути уменьшения параметров транзистора нужны новые решения. Проведенный анализ существующих и новых материалов, используемых в МОП-транзисторах, показал, что перспективными материалами для изготовления элементов транзистора размерами менее 90 нм являются увеличивающие быстродействие и уменьшающие энергопотребление соединения: напряженный кремний, материал с высокой диэлектрической проницаемостью (*high-k*), диэлектрик с низкой диэлектрической проницаемостью (*low-k*).

Литература

1. Дьяконов В. П. Intel. Новейшие информационные технологии. Достижения и люди. М.: СОЛОН-Пресс.- 2004.- 416 с.
2. Киреев В. Ю. Введение в технологии микроэлектроники и нанотехнологии. – М.:ФГУП «ЦНИИХМ», 2008. – 432 с.

3. Huff, H.R., Gilmer, D.C. (Ed.) *High Dielectric Constant Materials : VLSI MOSFET applications* Springer ISBN 3-540-21081-4 (2005)
4. Robertson, J. "High dielectric constant gate oxides for metal oxide Si transistors" *Institute Physics Publishing High dielectric constant gate oxides (Rep. Prog. Phys. 69 327-396 2006)*
5. <http://www.nanonewsnet.ru>

УДК 543.271; 533.5.08

СИСТЕМА АКТИВНОЙ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛАСТОМЕРНЫХ ДЕМПФЕРОВ ДЛЯ НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Александр Сергеевич Селиваненко

*Студент 4 курса,
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: В.П. Михайлов,
доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные технологии в
машиностроении»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Производство микрoeлектронной продукции связано с множеством проблем, одной из которых является воздействие вибраций на технологическое оборудование. При изготовлении микрoeлектронных компонентов, размеры которых не превышают нескольких микрометров малейшие вибрации приводят к браку, поэтому необходима виброзащита платформ, на которых установлено оборудование [1, 2].

Колебания высокой частоты успешно изолируются при помощи систем пассивной виброзащиты. Гораздо более опасными являются колебания с низкими частотами, для устранения которых и используются системы активной виброизоляции.

На кафедре «Электронные технологии в машиностроении» была разработана конструкция экспериментального стенда (рис. 1) с целью проведения испытаний демпфера для активной виброзащиты.

Демпфер (рис. 1) содержит неподвижную опору 6, сердечник из магнитного материала 5, электромагнитную катушку 4, корпус 3, мембрану из магнитореологического (МР) эластомера 2 с жестким центром 1, которая образует с сердечником 5 воздушный зазор.

Устройство работает следующим образом: при подаче управляющего тока в электромагнитную катушку 4 в магнитопроводе возникает замкнутое магнитное поле. В мембране 2 формируется радиальное магнитное поле с индукцией, величина которой имеет максимум вблизи сердечника 1. Под действием этой магнитной индукции мембрана с жестким центром перемещается в осевом направлении в пределах воздушного зазора.

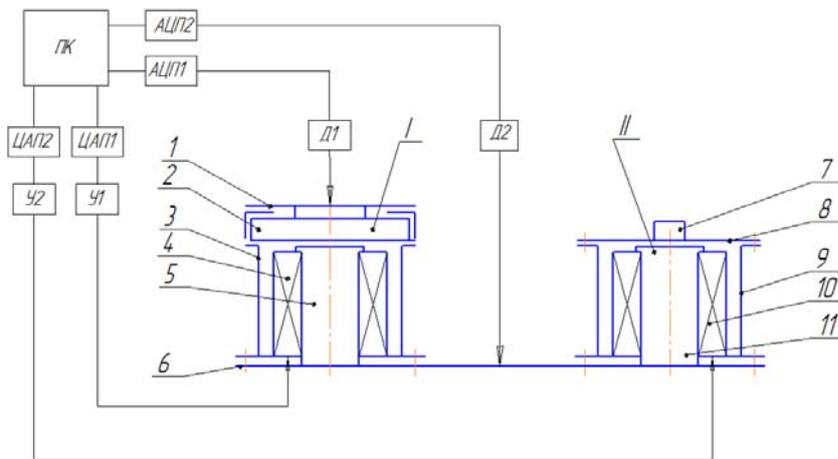


Рис. 1. Схема платформы для исследования активного МР-демпфера

Экспериментальная платформа (рис. 1) содержит демпфер I на основе МР – эластомера и задатчик вибраций II. Задатчик вибраций – специальное устройство, позволяющее задавать гармонические колебания платформы с заданной частотой и амплитудой.

Принцип работы задатчика аналогичен работе демпфера: при подаче управляющего переменного тока в электромагнитную катушку 10 в магнитопроводе возникает замкнутое магнитное поле. В грузе 7 формируется радиальное магнитное поле с индукцией, величина которой имеет максимум вблизи сердечника 11. Под действием этой магнитной индукции груз перемещается в осевом направлении в пределах воздушного зазора.

Модель поведения МР–эластомера при сдвиговой деформации представлена на рис.2. На эластомер действует внешнее магнитное поле с индукцией B (рис. 2). Мембрана активного демпфера изготовлена из МР – эластомера. Под действием внешней силы F нижняя стенка зазора смещается относительно верхней на величину X , при этом сдвиг равен $\gamma = \frac{X}{h}$

Сила магнитного сцепления F_N между соседними слоями частиц дисперсной фазы определяется по формуле Максвелла как $F_N = 9.81 \cdot 10^{12} \cdot \left(\frac{B}{5000}\right)^2 \cdot S_{cl} \cdot \varphi_v$, или как

$F_N = K \cdot B^2 \cdot S_{cl} \cdot \varphi_v$, где φ_v – коэффициент объемной концентрации частиц; S_{cl} – площадь сечения рабочего зазора, перпендикулярная магнитному потоку.

При сдвиге слоев МР–эластомера возникает касательная сила сопротивления $F_{\tau 1}$, обусловленная магнитным сцеплением между соседними слоями и равная $F_{\tau 1} = F_N \cdot \tan \alpha = K \cdot B^2 \cdot S_{cl} \cdot \varphi_v \cdot \frac{X}{h}$. Кроме того, возникает упругая касательная сила

$F_{\tau 2} = G S_{cl} \frac{X}{h}$, где G – модуль сдвига эластомера.

Коэффициент жесткости упругой мембраны МРЭ равен:

$$k = \frac{S_{cl}}{h} \cdot (K \cdot B^2 \cdot \varphi_v + G) = \frac{S_{cl}}{h} \cdot (9,81 \cdot 10^{12} \cdot \left(\frac{B}{5000}\right)^2 \cdot \varphi_v + G).$$

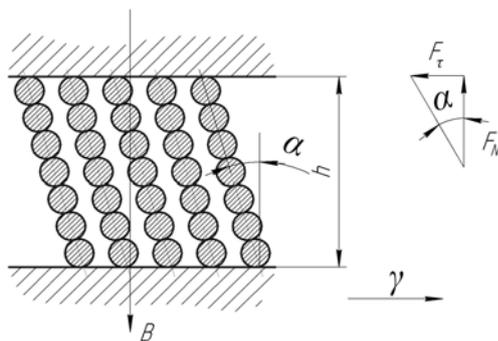


Рис. 2. Схема сдвиговой деформации мембраны из МРЭ

Использование МР-эффекта позволяет регулировать коэффициент жесткости k упругой мембраны за счет изменения величины магнитной индукции B , и, соответственно, частотные и точностные характеристики устройств активного демпфирования и микропозиционирования.

На экспериментальной платформе были проведены исследования зависимости коэффициента передачи амплитуды колебаний от силы тока для фиксированной частоты задатчика вибраций 100 Гц (рис. 3).



Рис. 3. График зависимости коэффициента передачи амплитуды колебаний демпфера на основе МР – эластомера

Методика проведения эксперимента

Собранная экспериментальная платформа (рис. 1) оснащена двумя датчиками перемещений, сигналы с которых по мере проведения эксперимента преобразуются с помощью АЦП и записываются в отдельный файл на ПК. Кроме того, с помощью программы LabView возможно управление задатчиком вибраций и МР-демпфером.

Проведение эксперимента:

- установить датчики перемещений согласно схеме на рис. 1;
- включить задатчик колебаний;
- с помощью ПО зафиксировать показания датчиков Д1 и Д2.

Данные, полученные при проведении эксперимента, показаны на рис. 4.

Экспериментальные данные (рис. 4) были получены в пассивном режиме работы МР-демпфера при нулевом управляющем токе на электромагнитной катушке демпфера.

Таким образом, исходя из полученных результатов, можно судить об изменении коэффициента передачи амплитуды вибраций, который при нулевом управляющем токе равен 0,88, т.е. наблюдается незначительное гашение колебаний.

При токе $I = 1$ А (рис. 3) наблюдался минимум коэффициента передачи амплитуды колебаний, который составлял 0,25.

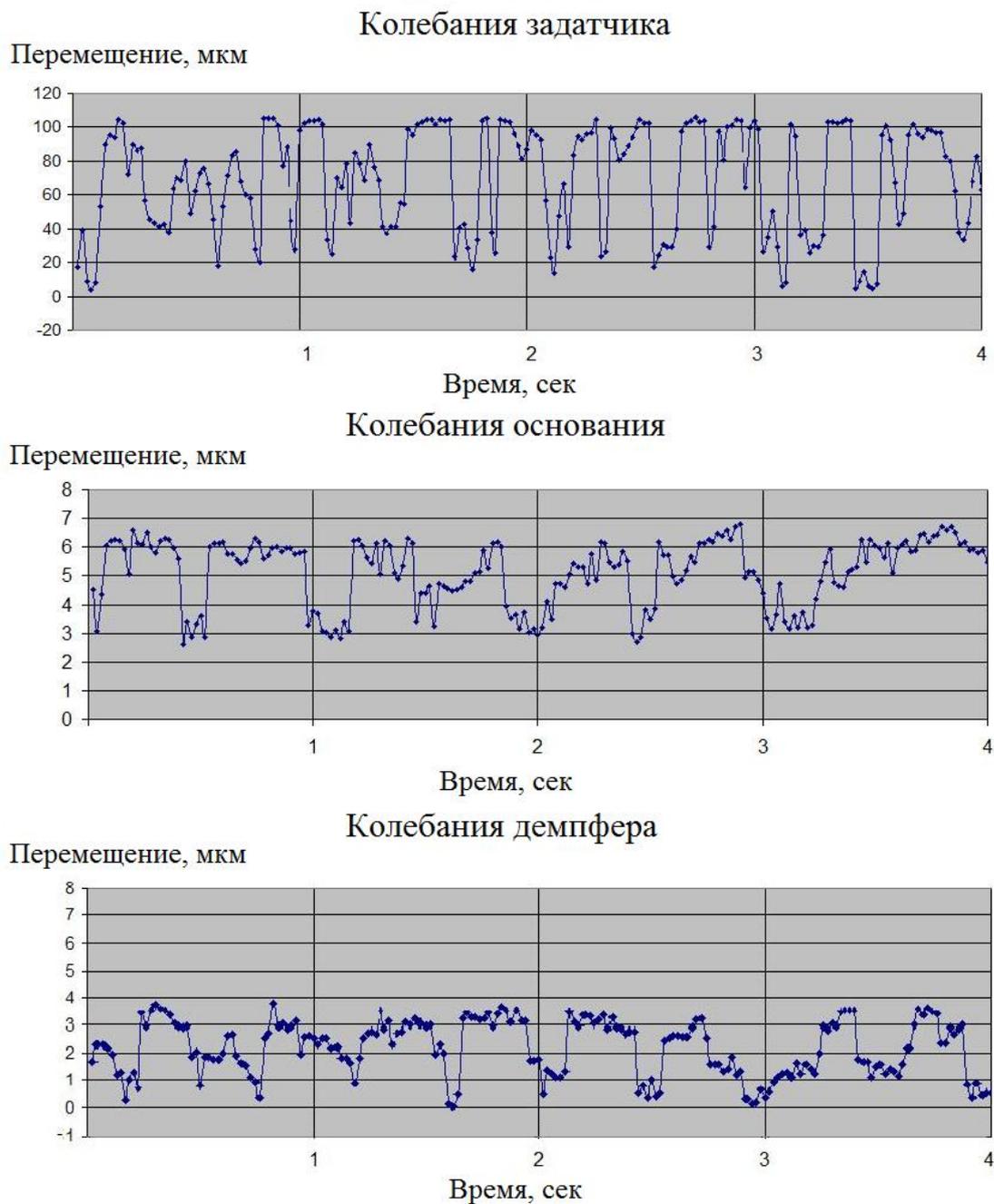


Рис. 4. Экспериментальные данные, полученные при пассивном режиме работы МР-эластомера

Кроме того, было проведено исследование зависимости перемещений мембраны демпфера под воздействием магнитного поля от силы тока, подаваемого на электромагнитную катушку (рис. 5).

В ходе эксперимента были исследована зона нечувствительности и остаточная деформация МР-демпфера. Эксперимент проводился при токах $I = 0..2$ А.

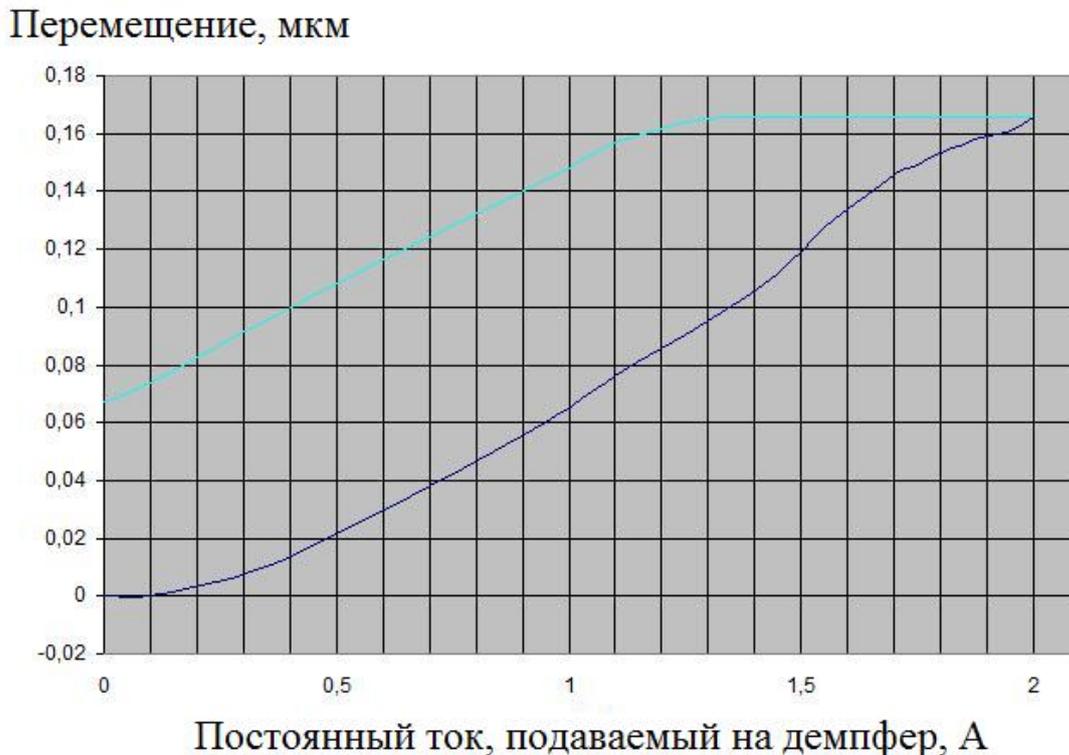


Рис. 5. Гистерезис МР-демпфера

Методика проведения эксперимента

В эксперименте использовался демпфер (рис. 1, I), блок питания, датчик перемещений.

Проведение эксперимента:

- установить датчик перемещений;
- подключить демпфер к блоку питания, предварительно выставив значения силы тока и напряжения равными нулю;
- фиксируя показания датчиков, повышать значение силы тока от 0 до 2 А с шагом в 0,05 А;
- при достижении 2 А уменьшать силу тока с шагом в 0,05 А до нуля.

Таким образом, эксперимент выявил наличие двух зон нечувствительности:

- при повышении силы тока от 0 до 0,1 А не наблюдается изменений в поведении эластомера;
- при достижении силы тока в 2 А и последующем его уменьшении до значения 1,3 А также не наблюдается деформации эластомера.

Полученные данные можно объяснить следующим образом.

В первом случае, силы тока величиной до 0,1 А недостаточно для преодоления сил статического трения между магнитомягкими частицами, распределенными в МР-эластомере, из которого сделана мембрана.

Во втором случае – при уменьшении силы тока от 2 до 1,3 А эластомер практически не изменяет своего положения также вследствие наличия статического трения между магнитомягкими частицами. Кроме того, оказывает некоторое влияние остаточная намагниченность магнитопровода и магнитных частиц МР-эластомера.

При уменьшении силы тока до нулевого значения в мембране наблюдается остаточная деформация около 70 мкм. Эта деформация объясняется, в основном, наличием в МР-эластомере вязкого трения, которое появляется при смещении макромолекул эластомера относительно друг друга.

Эти два параметра – зона нечувствительности и остаточная деформация – оказывают существенное влияние на точностные и динамические характеристики демпфера, а также на эффективность поглощения энергии колебаний МР-эластомером.

Выводы

1. В полуактивном режиме работы демпфера на основе МР-эластомера при подаче тока 0,3 А наблюдается резонанс системы. При этом коэффициент передачи вибраций имеет максимальное значение около 1,5, т.е. амплитуда колебаний возрастает.

2. При токе 1 А коэффициент передачи вибраций минимален (около 0,25), т.е. наблюдается эффективное гашение колебаний.

3. При дальнейшем возрастании тока (более 1 А) происходит увеличение коэффициента передачи вибраций вследствие повышения жесткости мембраны.

4. При токах от 0 до 0,1 А и от 2 до 1,3 А наблюдается зона нечувствительности, обусловленная наличием статического трения между магнитомягкими частицами, распределенными в МР-эластомере, из которого сделана мембрана. Кроме того, оказывает влияние остаточная намагниченность магнитопровода и магнитных частиц МР-эластомера.

5. МР-демпфер имеет остаточную деформацию около 70 мкм, которая объясняется, в основном, наличием в МР-эластомере вязкого трения, которое появляется при смещении макромолекул эластомера относительно друг друга.

Литература

1. Управление активной виброизоляцией и позиционированием магнитореологических устройств / В.П. Михайлов, Г.В. Степанов, А.М. Базиненков, И.К. Зобов, К.Г. Шаков. Нано- и микросистемная техника. - 2011, №7, - С. 5 – 9.

2. Mechanics and Physics of Precise Vacuum Mechanisms: FMIA Volume 91/ E.A. Deulin, V.P. Mikhailov, Y.V. Panfilov, R.A. Nevshupa / Series Editor R. Moreau, Springer, 2010. – 234 p.

УДК 621.362

ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИДИФФУЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ МАГНЕТРОННЫМ И ЭЛЕКТРОДУГОВЫМ МЕТОДОМ С СЕПАРАЦИЕЙ ПОТОКА ПЛАЗМЫ

Екатерина Николаевна Тушенцова

*Студентка 5 курса,
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Ю.В. Панфилов,
доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные технологии в
машиностроении»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана*

Объектом работы является термоэлектрический модуль (ТЭМ).

Для предотвращения встречной диффузии атомов меди в ТЭМ и увеличения срока службы применяют диффузионные барьерные слои, разделяющие проводник и полупроводник в месте их контакта. Эффективность барьерного слоя зависит от его структуры, размера зерна, технологии его нанесения. Барьерные покрытия из Nb, V, Cr, Ti, Rh, Pt, Zr, W, Ta, Mo, Ni и их соединений могут быть получены методами гальванического осаждения и методами вакуумного напыления с использованием термического испарения либо магнетронного распыления. Кроме того известны способы изготовления термоэлектрических модулей, в которых для нанесения барьерного покрытия используются технологии эпитаксиального роста пленок полупроводника на подложке из другого проводника. Достоинством модулей, изготовленных по этой технологии, является высокая надежность и механическая прочность, обеспечиваемые низкой дефектностью материала полупроводника и высоким качеством барьерных покрытий. Недостатком таких модулей является высокая стоимость и длительность технологического процесса изготовления [1].

Учитывая технико-экономические показатели, трудоёмкость технологий нанесения антидиффузионных покрытий, а также перспективу промышленного изготовления ТЭМ, для рассмотрения выделяют магнетронный метод и электродуговой с сепарацией потока плазмы. Целью данной работы является измерение характеристик получаемых покрытий и выявление метода нанесения наиболее качественных покрытий. Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Учесть результаты ранее проведённых исследований по методам нанесения покрытий.
2. Измерить характеристики покрытий, полученных разными методами.
3. Определить метод нанесения покрытий, позволяющий получать наиболее качественные антидиффузионные покрытия.

Исследование технологии нанесения покрытий позволило установить, что электродуговой метод имеет существенные преимущества перед магнетронным методом распыления материала, такие, как возможность управление потоком плазмы и его характеристиками проведения ионной очистки перед нанесением покрытия, что обеспечивают высокую чистоту поверхности и улучшение адгезии, короткая длительность технологического процесса нанесения покрытия, простота подготовки образцов [2].

Технология нанесения коммутационных покрытий магнетронным методом напыления материала

Объекты исследования – кристаллы из твердого раствора теллурида висмута размером $2,4 \times 1,6 \times 41$ мм с нанесенным коммутационным покрытием. Типовой образец кристалла с покрытием приведен на рис. 1 [3].

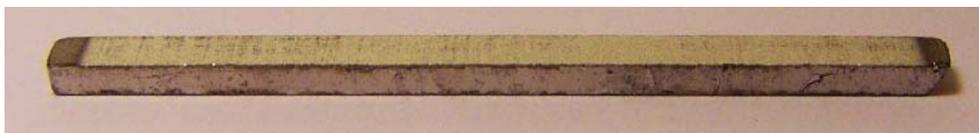


Рис. 1. Фотография типового образца кристалла из твердого раствора теллурида висмута с покрытием

Технологический процесс

Наносимое коммутационное покрытие:

Mo (1 мкм) + Ni (9 мкм) рис. 2

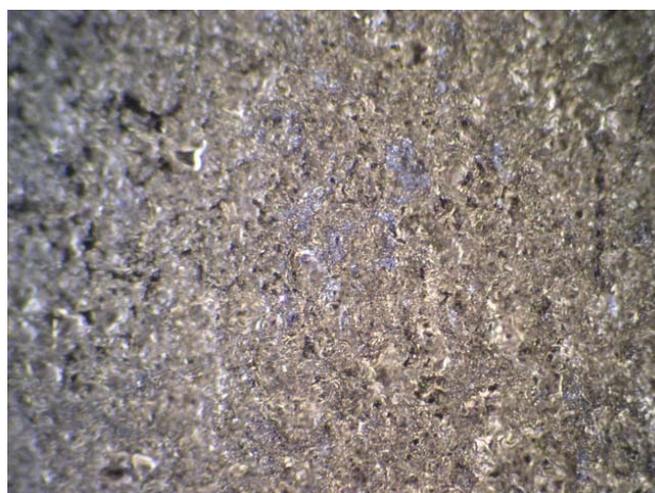


Рис. 2. Изображение границы раздела полупроводник-покрытие Mo+Ni (получено с помощью электронного микроскопа, увеличение – 135x)

- Выбор типа покрытия (толщина) и режима нанесения покрытия.
- Загрузка образцов в камеру.
- Откачка камеры до вакуума 10^{-4} Торр.
- Ионная очистка в среде остаточного газа. Время очистки 10 мин. Напряжение – 1000 В.
- Нанесение слоя покрытия из Mo необходимой толщины. Время нанесения покрытия – 1 ч. Напряжение – 400 В. Ток – 8-10 А.
- Нанесение слоя покрытия из Ni необходимой толщины. Время нанесения покрытия – 1,5 ч. Напряжение – 400 В. Ток – 8-10 А.
- Охлаждение камеры.
- Напуск воздуха в камеру до атмосферного давления.
- Открывание камеры и выемка образцов.

Использованное оборудование: установка с магнетронным распылительным устройством РМ-1-220/5-02.

Технология нанесения коммутационных покрытий методом электродугового напыления материала с помощью электродугового источника с сепарацией потока плазмы

Технологический процесс

Наносимое коммутационное покрытие: Zr (2 мкм)

- Выбор типа покрытия (толщина) и режима нанесения покрытия;
- Загрузка в камеру;
- Откачка камеры до вакуума 10^{-4} мбар;
- Ионная очистка в среде газа Ar. Время очистки 1-2 мин;
- Ионная бомбардировка ионами Zr. Время – 10-30 с. Напряжение импульсное (длительность импульса – 50 мкс) – 1200 В;
- Нанесение покрытия Zr. Время – 10 мин. Напряжение – 75 В на подложке. Ток -120 А;
- Температура на подложке во время нанесения покрытия – 120 °С;
- Охлаждение камеры в среде азота – 10 мин;
- Напуск воздуха;
- Открытие камеры и выемка образцов.

Наносимое коммутационное покрытие: Mo+HfZr (1+1 мкм)

- Выбор типа покрытия (толщина) и режима нанесения покрытия;
- Загрузка в камеру;
- Откачка камеры до вакуума 10^{-4} мбар;
- Ионная очистка в среде газа Ar. Время очистки 1-2 мин;
- Ионная бомбардировка ионами Zr. Время – 15 с. Напряжение импульсное (длительность – 50 мкс) – 1200 В;
- Ионная бомбардировка ионами Mo. Время – 10 с. Напряжение импульсное (длительность – 50 мкс) – 1200 В;
- Нанесение покрытия Mo. Время – 10 мин. Напряжение – 75 В на подложке. Ток -130 А;
- Нанесение покрытия со сплавленного катода в составе HfZr. Время – 15 мин. Напряжение – 75 В на подложке. Ток -120 А;
- Температура на подложке во время нанесения покрытия – 120 °С;
- Охлаждение камеры в среде азота – 10 мин;
- Напуск воздуха;
- Открытие камеры и выемка образцов.

Наносимое коммутационное покрытие: Ti (2 мкм)

- Загрузка в камеру;
- Выбор типа покрытия (толщина) и режима нанесения покрытия. Ввод данных в автоматизированную систему установки;
- Откачка камеры до вакуума 10^{-4} мбар;
- Ионная очистка в среде газа Ar. Время очистки 3 мин.
- Ионная бомбардировка ионами Ti. Время – 30 с. Напряжение импульсное (длительность импульса – 30 мкс) – 1000 В;
- Нанесение покрытия Ti. Время – 60 мин. Напряжение – 75 В на подложке. Ток -120 А;

- Температура технологического процесса во время нанесения покрытия – 150 °С;
- Охлаждение камеры в среде азота – 30 мин;
- Напуск воздуха;
- Открытие камеры и выемка образцов.

Измерение характеристик покрытий

Определение адгезии

Проверка прочности покрытия на отрыв проводилась на 5-ти образцах (ветви из твердого раствора теллурида висмута размером 1,4×1,4×1,6 мм) для каждого процесса нанесения вакуумного покрытия. Для измерения было необходимо спаять образцы в микромодули. Прочность покрытий проверялась на разрывной машине, анализ плоскости разрушения микромодуля - при помощи микроскопа МБС-10. Результаты определения величины адгезионной прочности покрытий приведены в табл. 1.

Табл. 1. Результаты определения величины адгезионной прочности покрытий

№ Кристалла	Тип коммутационного покрытия	Адгезионная прочность, МПа
1	Молибден (Mo) + Никель (Ni)	50
2		45
3		55
4		60
5		55
6	Цирконий (Zr)	30
7		32
8		43
9		38
10		39
11	Молибден (Mo) + Гафний (Hf) Цирконий (Zr)	65
12		67
13		59
14		65
15		62
16	Титан (Ti)	68
17		90
18		79
19		82
20		83

В результате проведенных исследований установлено, что наименьшая адгезия наблюдается у циркония Zr (38 МПа), а наибольшая – у Ti (80 МПа).

Определение микротвёрдости коммутационных покрытий

Микротвёрдость покрытий образцов определялась на микроскопе-микротвёрдомере. Результаты определения микротвёрдости покрытий сведены в табл. 2.

Табл. 2. Результаты определения микротвёрдости покрытий

№ Кристалла	Тип коммутационного покрытия	H, ГПа
1	Молибден (Mo) + Никель (Ni)	15
2		16
3		18
4		15
5		16
6	Цирконий (Zr)	24
7		23
8		19
9		23
10		25
11	Молибден (Mo) + Гафний (Hf) Цирконий (Zr)	25
12		23
13		25
14		28
15		21
16	Титан (Ti)	30
17		34
18		32
19		30
20		31

В результате исследования наименьшая твёрдость наблюдается у покрытия Mo+Ni (17 ГПа), а наибольшая обладает – Ti (32 ГПа).

Определение шероховатости

Отклонение от плоскостности поверхности грани образца должно быть не более 0,05 мм. Испытания проводились на профилографе-профилометре. Результаты определения величины шероховатости покрытий представлены в табл. 3.

Табл. 3. Результаты определения величины шероховатости покрытий.

№ Кристалла	Тип коммутационного покрытия	R _a	
1	Молибден (Mo) +	3,2	
2		Никель (Ni)	3,2
3	Молибден (Mo) +	3,2	
4		Никель (Ni)	3,2
5		3,2	
6	Цирконий (Zr)	3,5	
7		3,5	
8		3,5	
9		3,5	
10		3,5	
11	Молибден (Mo) +	3,8	
12		Никель (Ni)	3,8
13		Гафний (Hf)	3,8
14		Цирконий	3,8
15		(Zr)	3,8
16	Титан (Ti)	3,2	
17		3,2	
18		3,2	
19		3,2	
20		3,2	

Исследования показали, что шероховатость образцов практически не отличается друг от друга и близка к шероховатости поверхности кристалла.

Измерение электропроводности образцов до и после отжига

По специальной технологии [3] осуществляли сборку 10 ветвей n – типа проводимости размером 1,4×1,4×1,6 мм в микромодули. Испытания проводили на установке для измерения термоэлектрической добротности. Результаты измерения электропроводности приведены в табл. 4.

Табл. 4. Результаты измерения электропроводности.

№ Кристалла	Тип коммутационного покрытия	Электропроводность до отжига, Ом ⁻¹ ×см ⁻¹	Электропроводность после отжига, Ом ⁻¹ см ⁻¹
1	Молибден (Mo) + Никель (Ni)	1011	1041
2		1063	1233
3		1075	1097
4		1145	1175
5		1167	1193
6	Цирконий (Zr)	795	820
7		1047	1019
8		1034	1083
9		954	991
10		1193	1256
11	Молибден (Mo) + Гафний (Hf) Цирконий (Zr)	646	667
12		494	757
13		598	635
14		569	610
15		792	820
16	Титан (Ti)	1180	1144
17		1510	1541
18		1240	1265
19		1365	1378
20		1398	1435

В результате измерений электропроводности образцов до и после отжига установлено, что имеет место существенное различие между этими образцами, что говорит о протекании диффузионных процессов при нагреве образцов. Наилучшие показатели имеют образцы с многослойным покрытием Mo+Zr+Hf.

Среднеарифметические показатели для измеренных характеристик покрытий представлены в сравнительной табл. 5.

Табл. 5. Сравнение характеристик покрытий.

	Метод нанесения	Магнетронный	Электродуговой с сепарацией потока плазмы		
	Материал покрытия	Mo+Ni	Zr	Mo+HfZr	Ti
	Толщина покрытия, мкм	1+9	2	1+1	2
Свойства покрытий	Адгезионная прочность, МПа	53±7	36±6	64±5	80±10
	Микротвёрдость, ГПа	16±2	23±4	24±3	31±3
	Шероховатость, мкм	3,2	3,5	3,8	3,2
	Электропроводность до отжига, Ом ⁻¹ ×см ⁻¹	1092±81	1004±210	620±126	1339±159
	Электропроводность после отжига, Ом ⁻¹ ×см ⁻¹	1148±107	1034±214	698±88	1353±209

Как показали измерения характеристик покрытий, Ti барьерное покрытие, нанесенное электродуговым методом с сепарацией потока плазмы, обладает наиболее высокими характеристиками по твёрдости и адгезионной прочности.

Заключение

Для изготовления термоэлектрических модулей наиболее рациональным является метод нанесения материала с помощью электродугового источника с сепарацией потока плазмы, позволяющий управлять потоком плазмы и его характеристиками проведения ионной очистки перед нанесением покрытия, тем самым обеспечивая высокую чистоту поверхности, улучшение адгезии, отсутствие дефектов. Наиболее перспективным барьерным покрытием признано Ti барьерное покрытие, как покрытие, обладающее наилучшими адгезионными и прочностными характеристиками.

Литература

1. Патент RU 2425434 «Способ изготовления термоэлектрического модуля с увеличенным сроком службы»/ Башков В.М., Беляева А.О., Горбатовская Т.А. и др.
2. Тушенцова Е.Н., Панфилов Ю.В. Исследование методов уменьшения диффузии меди в теллурид висмута в термоэлектрических модулях/ Материалы XVII Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России», материалы XXIV Международного симпозиума «Тонкие плёнки в электронике», материалы IV Международной научно-технической конференции «Наноинженерия». – 2011. – С.102-106.
3. Разработка технологии напыления коммутационных покрытий на кристаллы ТРТВ/ Отчет об ОКР (промежуточ.)/НИИРЛ МГТУ им.Н.Э.Баумана – М. 2008.-267с.

УДК 621.521

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ ВАКУУМНОЙ ЛИНИИ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ТОПЛИВА

Антон Сергеевич Ухичев

*Студент 1 курса,
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Е.А. Деулин,
доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные технологии в
машиностроении»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Целью работы являлась разработка структуры вакуумно-технологической линии производства экологически чистого, энергетически эффективного, наноструктурированного топлива, получаемого из сырья органического происхождения, в частности, каменного угля.

Фундаментом и теоретической основой представленной работы является физика процессов растворения атомов водорода и его изотопов в обрабатываемом материале из монослоя сорбата находящегося на поверхностях, и происходящих в вакууме [1] или лишённой кислорода атмосфере. Несмотря на то, что данное явление, сопровождающее процесс трения, справедливо для любых материалов [2], то исходным сырьём в разрабатываемой и представляемой технологии могут быть отходы лесной, лесоперерабатывающей, сельскохозяйственной, торфоперерабатывающей, химической или угольной отраслей.

Показано, ввиду взрывоопасности представленной технологии она должна осуществляться во взрывобезопасной среде, в качестве которой выбран вакуум, получаемый водокольцевыми насосами. Поэтому предлагаемая структура вакуумной технологической линии должна выглядеть следующим образом:

1. Первым элементом линии, естественно, является устройство загрузки исходного сырья, но ввиду того, что обработка (истирание) сырья должно производиться в вакууме, то в процессе загрузки, сырьё сразу попадает в герметичную шлюзовую камеру.

2. Следующим элементом линии является камера первичного помола, в которой происходит два процесса: первичная дефрагментация элементов исходного сырья и начало процесса наводораживания сырья в соответствии с формулой (1):

$$C_H(x,t) = (C_{1H} - C_0) \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right) + C_0, \quad (1)$$

где $C_H(x,t)$ – концентрация атомов диффундирующего водорода (протия, дейтерия, трития) на глубине x в момент времени t ;
 C_0 – исходная концентрация водорода (протия, дейтерия, трития);
 C_{1H} – концентрация атомов водорода в первом монослое сорбата на поверхности сырья;
 D – коэффициент диффузии атомов водорода (протия, дейтерия, трития) в материале сырья.

3. После окончания первичного измельчения сырье загружается в шлюзовую камеру, играющую роль промежуточного накопителя и разделителя элементов, находящихся на разных стадиях обработки.

4. Следующим элементом линии является камера вторичного помола, в которой так же как и в первой происходит два процесса: вторичная дефрагментация элементов сырья и окончание процесса наводораживания сырья в соответствии с формулой (2):

$$C_H(x,t) = (C_{1H} - C_0 + \Delta C) \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right) + C_0 + \Delta C, \quad (2)$$

где ΔC – изменение исходной концентрации водорода (протия, дейтерия, трития) произошедшее за время первичной обработки;

5. После окончания вторичного измельчения сырье загружается в следующую шлюзовую камеру, так же играющую роль промежуточного накопителя и разделителя элементов, находящихся на разных стадиях обработки.

6. Устройство формирования окончательной суспензии – наноструктурированного топлива повышенной теплотворной способности.

На рис. 1 в изометрии показана 3D модель вакуумно-технологической линии для получения энергетически эффективного наноструктурированного продукта, созданная автором.

Линия представляет собой цепочку последовательно соединённых герметичных (вакуумно-плотных) камер, в которых последовательно осуществляются операции первично и вторичного измельчения исходного сырья до формирования продукта с окончательным наноразмером ($R=100$ нм, где R - радиус описанной окружности конечного продукта), операции разделения по фракциям на различных этапах обработки, операции формирования суспензии, как окончательного продукта.

Технической основой представленной работы было выполнение экспериментов, иллюстрирующих вышеупомянутую физику процессов растворения атомов водорода и его изотопов в обрабатываемом материале из монослоя сорбата (водорода, дейтерия, трития) находящегося на поверхностях материала подвергаемого трению. Использование водокольцевых насосов необходимо:

Для исключения кислорода из первоначальной атмосферы, для обеспечения взрывобезопасности;

Для создания монослоя водорода на поверхности сырья, образующегося в результате диссоциации молекул воды в первом монослое.

В процессе эксперимента [3] осуществлялась имитация процесса измельчения исходного продукта на мельницах, находящихся в камерах 4 и 6 рис. 1, и определение изменения его теплотворной способности в результате наводораживания.

В ходе первого эксперимента, при прочих равных условиях, поджигался 1 г цельного куска сухого спирта. Под огнём находился накрытый крышкой металлический сосуд с водой рис. 2 при температуре 5°C.

После полного сгорания топлива показания термометра увеличились до t_1 . (табл. 1).

В ходе второго эксперимента, при прочих равных условиях, поджигался 1 г полученного порошкообразного сухого спирта.

После полного сгорания топлива показания термометра увеличились до t_2 . (см. табл. 1)

№	Элемент
1	Устройство загрузки исходного сырья
2	Шибберные заслонки
3	Шлюзовые камеры
4	Камера первичного помола
5	Вибросепаратор с ситом
6	Камера вторичного помола
7	Камера отделения НANO частиц твердой составляющей топлива
8	Камера формирования суспензии
9	Устройство выгрузки топлива
10	Пульт управления
11	Водокольцевой вакуумный насос
12	Система подачи этилового спирта в камеру формирования суспензии

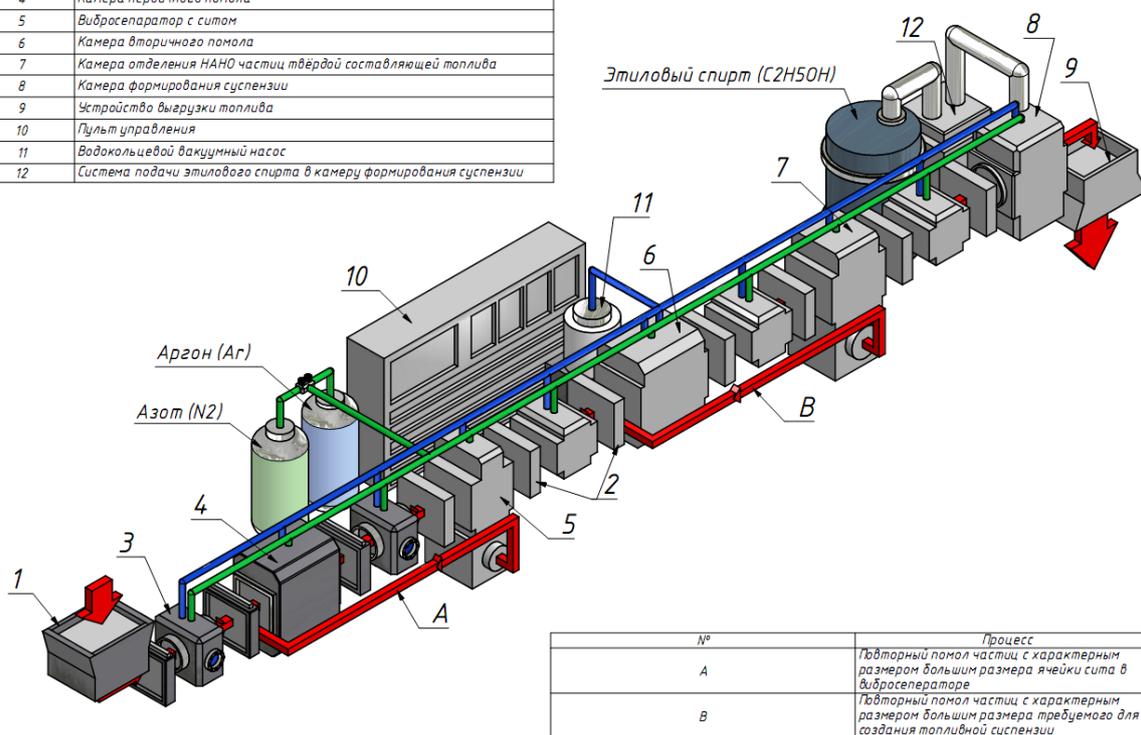


Рис. 1. Изометрия 3D модели вакуумно-технологической линии

Аналогичные эксперименты проводились и с каменным углем. Данные полученные в ходе экспериментов приведены в табл. 1.

$$\lambda = \frac{\bar{t}_2}{\bar{t}_1} = \frac{84,5^0}{80,6^0} \approx 1,048 = 104,8\% \quad (3)$$

Таким образом, результаты экспериментов показывают, что измельчение сырья по представленной технологии повышает теплотворную способность исходного продукта на 4,8 %.

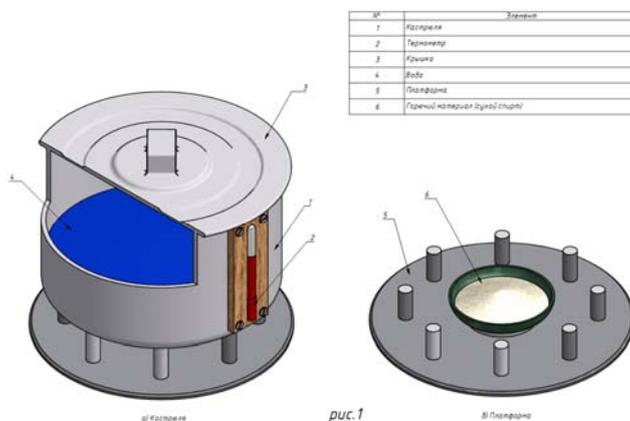


Рис. 2. Накрытый крышкой металлический сосуд с водой, находящейся под огнем

Табл. 1. Результаты экспериментов с сухим спиртом

№	Температура воды до сгорания исходного топлива, t_0 °C	Температура воды после сгорания исходного топлива, t_1 °C	Температура воды после сгорания растёртого топлива, t_2 °C
1	20	85	88
2	19	82	85
3	19	80	86
4	18	80	84
5	20	82	84
6	20	79	85
7	19	77	82
8	17	79	83
9	18	81	85
10	19	81	83
$t_{\text{средн.}}$	18,9	80,6	84,5

Выводы:

1. Разработанная схема вакуумной линии может быть реализована в виде линии, состоящей из пяти рабочих вакуумных камер, соединенных единой системой транспортировки сырья, и сохраняющих бескислородную атмосферу.

2. Показано, что создание защитной бескислородной атмосферы легко реализуется с помощью водокольцевого вакуумного насоса.

3. Экспериментами, моделирующими технологический процесс формирования твердой составляющей наноструктурированного топлива, показано, что представленный технологический процесс обеспечивает увеличение теплотворной способности исходного сырья на 4,8%.

Литература

1. *Deulin E.A.* Exchange of gases at friction in vacuum// ECASIA '97. - John Wiley & sons, Nov. 1997.- pp. 1170-1175.

2. *Деулин Е.А.*, Единство nano физики трения для различных технологий машиностроения / Трение и Смазка в Машинах и Механизмах, №,№ 9-10, 2010, С. 43-47, 35-43.

3. *Ухичев А.С.*, Исследование возможностей использования винтовых мельниц для формирования наноструктурированного топлива органического происхождения / Шаг в будущее Москва, 2011.

Секция №12
Лазерные технологии в машиностроении

УДК 621.375.826

ИССЛЕДОВАНИЕ ОЧИСТКИ ОКИСЛОВ С МЕДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

Любовь Николаевна Баландина, Кирилл Леонидович Попов

*Студенты 5 курса,
кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: М.А. Коротаева,
аспирант кафедры «Лазерные технологии в машиностроении»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Введение. Одним из самых перспективных направлений лазерной обработки стало использование лазеров в реставрации археологических находок и произведений искусства, в том числе различных металлических артефактов. В данной области лазер применяется в качестве инструмента для очистки поверхности от окислов органических загрязнений, при этом, не изменяя ни фазовый состав металла, ни рельеф поверхности.

Металлические изделия, незащищённые перед воздействием воздуха, почвы (например, археологические находки) или воды, могут иметь на своей поверхности различные коррозионные слои. Бронза, медь и серебро имеют относительно высокую сопротивляемость окружающей среде, но, несмотря на это, с течением времени покрываются тонкой сложной по составу коркой оксидов. Железные же объекты сравнительно больше подвержены коррозии [1].

Основными проблемами, возникающими при очистке металла лазером, являются локальное микроплавление и обесцвечивание металлической поверхности.

При взаимодействии лазерного излучения со сложным по составу загрязнением, которое образовалось под действием окружающей среды, будут происходить процессы, зависящие как от параметров лазерного излучения (длина волны, длительность импульса, мощность излучения, положение фокуса), так и от оптических свойств загрязнения (коэффициент отражения, коэффициент поглощения). Таким образом, перед очисткой металлической поверхности необходимо оптимизировать параметры лазера на основе анализа оптических свойств очищаемой поверхности. А мощность лазерного излучения должна быть такой, чтобы испарять загрязнения и окислы, но при этом минимальным образом воздействовать на основной металл. Существует ещё один способ обеспечения большей сохранности изделия при лазерной обработке. Он заключается в нанесении на поверхность изделия перед обработкой тонкого слоя воды или спиртосодержащей жидкости, которая проникает внутрь загрязнённого слоя. При этом часть энергии поглощается жидкостью и при быстром температурном расширении жидкости слой загрязнения удаляется. Такая очистка называется влажной. По сравнению с сухой взаимодействием лазерного излучения с основным металлом уменьшается, что благотворно влияет на сохранность. Также следует сказать, что в процессе взрывообразного испарения участвуют используемые для защиты поверхности, вещества с низкой температурой плавления (например, воск, масла) [2].

Лазерная очистка заключается в местном нагреве загрязнения лазерным излучением. При этом слой удаляется по причине процессов быстрого термического расширения и абляции структур, имеющих более высокий коэффициент поглощения излучения и меньшую температуру испарения, чем основной металл.

В данной работе будет рассмотрено воздействие лазерного излучения на оксиды меди на примере окисленных медных монет, на которых имеется множество очагов

окисления. Они образуются под воздействием влажной атмосферы, серноокислых и солевых соединений в почве. При этом медь разрушается с образованием продуктов коррозии, которые представлены в табл. 1. На археологических находках из меди продукты коррозии имеют сложное строение и состав. В основном это оксиды и соли меди, но также могут присутствовать и оксиды олова и других элементов, входящих в сплав, из которого сделано изделие [3].

Табл. 1. Типичные продукты коррозии меди

Химическое и минералогическое название	Химическая формула	Цвет
Гидрокарбонат (азурит)	$Cu_3(OH)_2(CO_3)_2$	синий
Гидрокарбонат (махакит)	$Cu_2(OH)_2CO_3$	зеленый
Закись меди (куприт)	Cu_2O	красный
Черновая медь (тенорит)	CuO	серый и черный
Хлористая медь (нантоцит)	$CuCl$	белый
Хлорид меди (II)	$CuCl_2 \cdot 2H_2O$	синий
Гидрооксихлорид меди	$Cu_2(OH)_3Cl$	зеленый
Сульфид меди (халькоцит)	Cu_2S	черный
Сульфид меди (ковеллин)	CuS	сине-черный
Сульфат меди (гидрокианит)	$CuSO_4$	зеленый
Гидросульфат (антлерит)	$Cu_3(SO_4)(OH)_4$	зеленый
Гидросульфат (брошантит)	$Cu(SO_4) \cdot 3Cu(OH)_2$	зеленый
Силикат меди (хризоколла)	$CuSiO_3 \cdot 2H_2O$	сине-зеленый

В следующей таблице (табл. 2) представлены оптические свойства меди в зависимости от длины волны излучения:

Табл. 2. Оптические свойства меди в зависимости от длины волны излучения

Длина волны (мкм)	Коэффициент поглощения ($см^{-1}$)	Коэффициент отражения
0.266	7.8×10^5	0.23
0.5	7.14×10^5	0.43
0.8	7.7×10^5	0.86
1.06	7.7×10^5	0.90
10.6	7.7×10^5	0.99

Как можно видеть из таблицы, Nd:YAG лазер с длиной волны 1.06 мкм должен подойти для наших исследований, так как высокий коэффициент отражения обеспечивает сохранность изделия от оплавления.

Тепловая модель

Процесс лазерной абляции загрязнений может быть описан только в грубом виде, поскольку оптические свойства удаляемых веществ могут значительно отличаться друг от друга. Как показывает опыт, на поверхности одного и того же изделия могут находиться совершенно различные по составу вещества. Частицы веществ могут быть разной текстуры, размеров и равномерности прилегания к основному металлу. Таким образом, можно заключить, что критическая плотность мощности, при которой начинается процесс абляции, будет меняться от участка к участку очищаемой поверхности [4].

Основным условием безопасного применения метода лазерной реставрации является выборочность и ограничение процесса удаления загрязнений. При оптимизации выходных параметров лазерного излучения должны быть проведены исследования на селективность воздействия излучения [5].

При очистке абляцией оксиды меди облучаются короткими лазерными импульсами с крайне высокой плотностью мощности, и таким образом окислы расплавляются и интенсивно испаряются. Обычно в расчётах лазерного воздействия используется теплопроводностная модель, но она не способна в полной мере отразить взаимодействия лазерного излучения с оксидом. Поэтому в этом случае будет применена двумерная модель для оценки области термического воздействия.

Данная модель была разработана Zhang, и она описывала лазерную абляцию оксидов меди [6].

На рисунке показана двумерная модель, учитывающая двухслойную структуру окисленной медной поверхности.

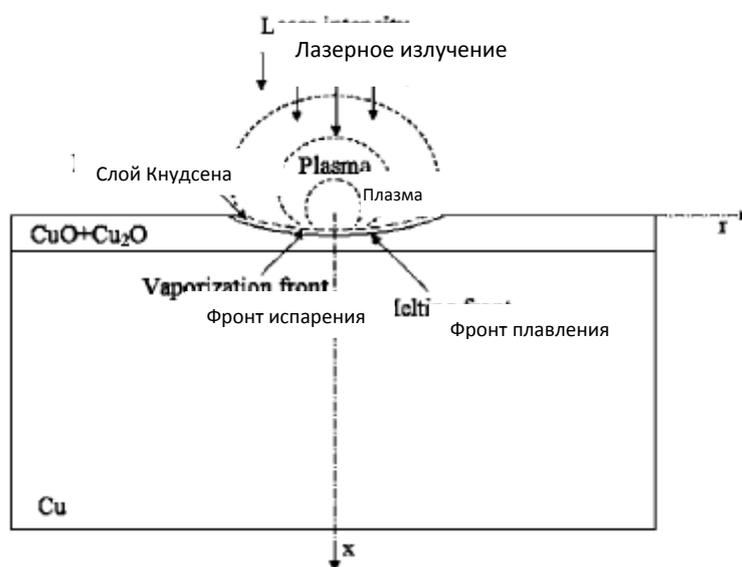


Рис. 1. Двумерная модель абляции оксидов меди

Правильный выбор длительности импульса важен при очистке металлических поверхностей, имеющих низкую температуру плавления.

С помощью соотношения баланса энергии может быть получена приблизительная оценка температуры:

$$\Delta T = \frac{F_a}{\rho_g C_g l},$$

где $F_a = C(1-R)Ie^{-(r/b)^2}$ - плотность энергии поглощения, образующаяся в результате фототермического преобразования световой энергии лазерного пучка при падении на металлическую поверхность, b — радиус луча, падающего на поверхность, C — корректирующий коэффициент от воздействия плазмы. $C = 1$, если интенсивность падающего излучения будет меньше, чем необходимо для формирования плазмы (3×10^7).

Экспериментальная часть

Для экспериментов использовалась установка LRS-150A на базе активного элемента из алюмоиттриевого граната с неодимом с длиной волны 1064 нм. Минимально возможная длительность импульса 100 нс.

Представленный результат получен при воздействии одного импульса на каждый из участков медной поверхности с энергией 3 Дж, длительностью импульса 0,2 мс, диаметром пятна 0,5 мм. С цифры 0 удаление, предположительно, малахита, который с течением времени разрушает поле монеты, осуществилось посредством трёх импульсов.

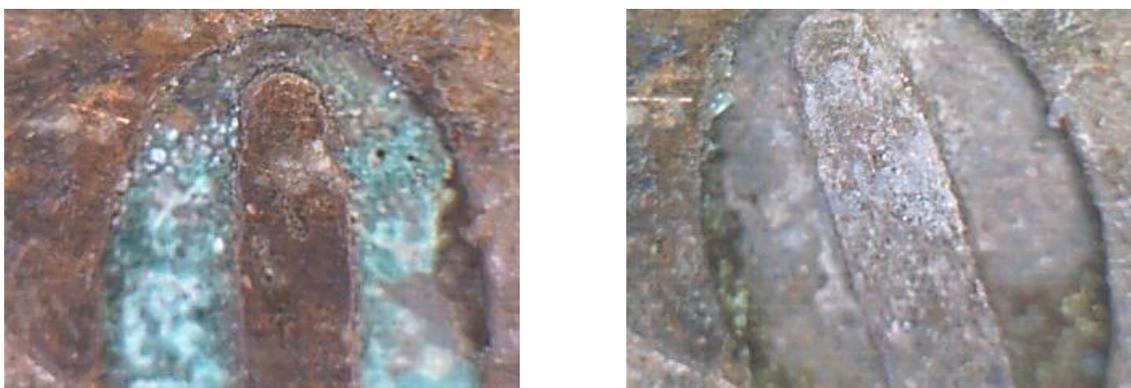


Рис. 2. До и после лазерного воздействия на окисленную поверхность меди



Рис. 3. До и после лазерного воздействия на окисленную поверхность меди

Однако при этом участки, на которых не было зелёного окисла, покрылись окислом, образовавшегося вследствие реакции меди с окислителями под воздействием высокой температуры. Таким образом, можно заключить, что для более безопасной обработки необходимо снижать длительность импульса, чтобы медь не успела вступить в реакцию окисления.

При уменьшении длительности импульса до минимально возможного значения (0,1 мс) и увеличении его мощности до 100 % можно добиться следующих результатов:

Видно, что значительных изменений на окисленной поверхности не произошло даже при воздействии лазерного излучения в одну и ту же точку.

При увеличении плотности мощности, путём уменьшения диаметра пятна до 0,2 можно увидеть, что начинается микроплавление металла:

Применяя метод влажной очистки, можно заметить значительное улучшение воздействия лазерного излучения на окисленную поверхность. Дополнительного окисления почти не происходит. На поверхности обнажаются рытвины, в которых находились очаги окисления. В качестве жидкости для смачивания поверхности использовалась обычная водопроводная вода.



Рис. 4. До и после лазерного воздействия на поверхность окисла при минимально возможной длительности импульса на данной установке



Рис. 5. Микроплавление поверхности при уменьшении диаметра пятна 0,2 мм

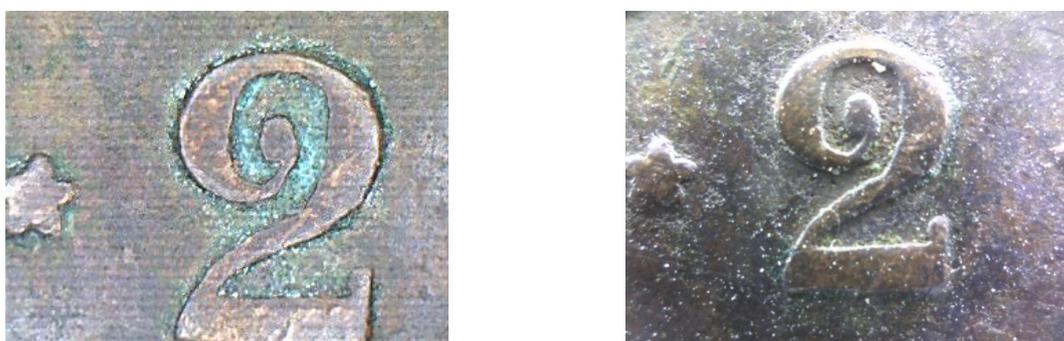


Рис. 6. До и после лазерного воздействия при использовании влажного метода очистки

Выводы:

Были исследованы различные способы лазерного удаления окислов с медной поверхности. Самым удачным на данной установке, как и ожидалось, оказался метод влажной очистки лазерным излучением.

В дальнейших работах необходимо провести подобные исследования, но на других лазерных установках с длительностью импульса порядка нескольких нанометров и высокой мощностью, а также провести сравнение между полученными результатами. Кроме этого, необходимо изучить воздействие лазерного излучения другой длины волны (например, 532 нм) на окисленную медную поверхность.

Литература

1. *P. Pasquet, P. Psyllaki, R. Oltra, J.P. Boquillon, P. Leiderer, J. Boneberg, S. Joiret, A. Hugot-Le Goff.* Laser Cleaning of Oxidised Metallic Materials: Role of the Optical Properties of the Oxide Films. - Laser Techniques and Systems in Art Conservation, Renzo Salimbeni, Editor, 2001, pp 38-41.
2. *Lee J. M., Watkins K. G.* Laser removal of oxides and particles from copper surfaces for microelectronic fabrication. //Optics Express, Vol. 7, No. 2, 2000, pp 68-76.
3. *Siano S., Grazi F., Парфёнов В.А.* Лазерная очистка позолоченных бронзовых поверхностей // Оптический журнал. – 2008, №7, том 75, с. 18-29.
4. *Геращенко М.Д.* Лазерная очистка медных поверхностей. – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет.
5. *Salimbeni R., Pini R., Siano S.* Controlled laser ablation for the restoration of artworks: principles and applications. - Institute of Quantum Electronics, Florence, Italy, pp 18-26.
6. *Jie Zhang, Youneng Wang, Peng Cheng, and Y. Lawrence Yao.* Effect of pulsing parameters on laser ablative cleaning of copper oxides // Journal of applied physics 99, 064902, 2006.

УДК 620.179.18

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Александр Владимирович Пересторонин

*Магистр 1 года,
кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Б.М. Фёдоров,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в
машиностроении»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Сварочные процессы – эффективный метод создания неразъемных соединений в судостроении. Они позволяют существенно ускорить сборочные операции при постройке судна. Однако, одним из наиболее важных факторов, влияющих на эффективность его применения, является формирование при сварке остаточных напряжений и деформаций, существенно влияющих на технологичность этих процессов [1].

Расширение или сокращение металла от неравномерного нагрева или охлаждения, а также от структурных превращений образуют так называемые собственные, или внутренние деформации и напряжения при сварке. Они существуют в теле без приложения внешних нагрузок [2].

Как правило, остаточные напряжения рассматривают как компоненты тензора, и выделяют следующие величины, характеризующие напряженное и деформированное состояние металла:

- Нормальные напряжения $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$
- Касательные напряжения $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$
- Линейные деформации $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$
- Сдвиговые деформации $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$
- Перемещения точек тела по осям u – по оси Ox , v – по оси Oy , w – по оси Oz .

На рис. 1 показано расположение осей при рассмотрении остаточных напряжений.

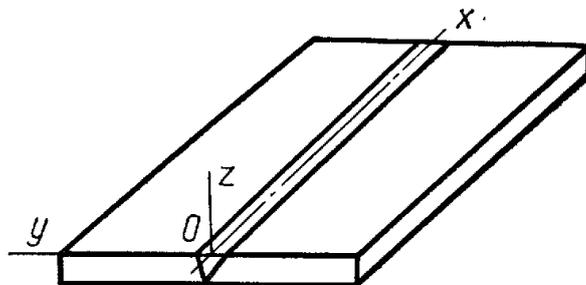


Рис. 1. Расположение координатных осей при рассмотрении остаточных напряжений

Если температурные напряжения в процессе нагрева будут выше предела текучести материала, то после снятия нагрева в теле останутся остаточные напряжения [3]. Этот механизм их образования характерен для всех процессов сварки, связанных с плавлением металла.

Интерес к исследованию остаточных напряжений в сварных конструкциях обуславливается тем, что они существенно влияют на прочность и долговечность сварного соединения. Как известно, для пластичных материалов остаточные напряжения практически не влияют на величину остаточных напряжений, однако в условиях хрупкого разрушения их влияние может быть значительным. В частности, хрупкому разрушению способствует объемное напряженное состояние металла [3].

Растягивающие остаточные напряжения снижают вибрационную прочность сварных конструкций. Если они действуют в зонах, где есть концентрация напряжений и неоднородность механических свойств, то там в первую очередь возникают разрушения от усталости [2].

На рис. 2 показаны зоны, остаточные напряжения в которых оказывают существенное влияние на временную и длительную прочность сварного соединения толстостенных конструкций.

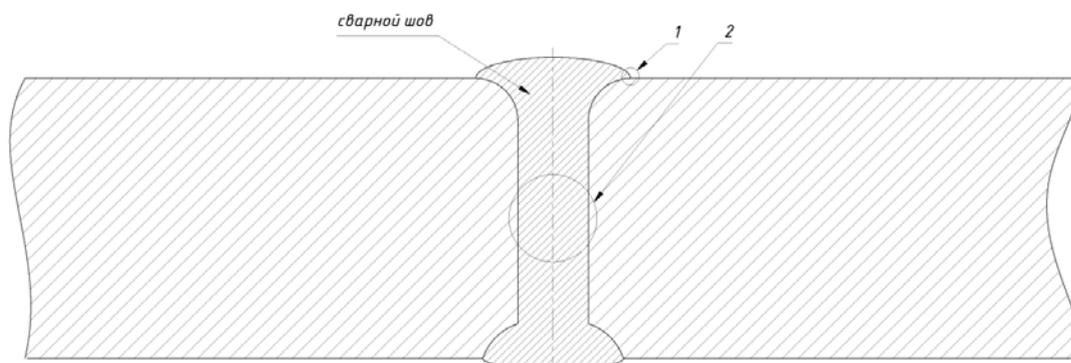


Рис. 2. Сварной шов в толстостенной конструкции.

Двухосные напряжения в зоне 1 влияют на долговечность сварного соединения;
трехосные напряжения в зоне 2 – на временную прочность

Различают одноосное, двухосное и трехосное напряженные состояния. На практике реализуется трехосное состояние, но в отдельных случаях, в частности, при рассмотрении поверхностных слоев, задачу часто упрощают. Так как один или два компонента остаточных напряжений могут оказаться намного меньше остальных, то такое упрощение позволяет, незначительно снизив точность, существенно упростить определение остаточных напряжений.

На сегодняшний день напряженное состояние можно определить как экспериментальными, так и теоретическими (расчетными) методами.

Существуют теоритические подходы, позволяющие оценивать напряженное состояние в различных конструкциях. В [4] приведены методики расчетного определения напряжений в зависимости от параметров теплового процесса. Таким образом, можно без проведения экспериментов оценить величину остаточных напряжений в сварных конструкциях различной конфигурации.

Однако, главным недостатком расчетных методов является невозможность учета влияния всех параметров технологического процесса, свойств металла и его состояния. Также сложно учесть влияние фазовых превращений, введения присадочного материала и других важных факторов, существенно изменяющих характер распределения остаточных напряжений и деформаций.

В силу указанных причин, широкое распространение получили экспериментальные методы определения остаточных напряжений. Все эти методы можно разделить на две большие группы: механические и физические.

Механические методы – наиболее старые и глубоко изученные. Отдельные методики уже стандартизированы (пример: стандарт ASTM E837 - 08e1 «Стандартный метод тензометрического определения остаточных напряжений с использованием высверливаемого отверстия») и широко применяются во многих странах.

Механическими методами можно добиться высокой точности, определять на различной глубине напряжение вдоль всех осей. Кроме того, они позволяют получить абсолютное значение остаточных напряжений.

Общий принцип заключается в освобождении отдельных участков механическим путем, определении изменения показателей тензометров и по известным формулам определения остаточных деформаций и напряжений.

Главным недостатком методов является необходимость нарушения целостности контролируемого объекта разрезанием, высверливанием отверстий, нанесением меток и т. д. Это приводит к невозможности применения их к реальной конструкции, необходимости опосредованного исследования путем привлечения образцов-свидетелей.

Основными механическими методами являются разрезание (на полосы, квадраты и т. д. в зависимости от измеряемых компонентов напряжения) и высверливание отверстий.

Пример приведен на рис. 3 [5].

Поскольку механические методы не могут быть применены для контроля состояния работающих конструкций, трудоемки и применяются, в основном, в лабораторных условиях, был разработан ряд методов, позволяющих использовать изменение какого-либо измеримого физического параметра при изменении напряженного состояния для его оценки.

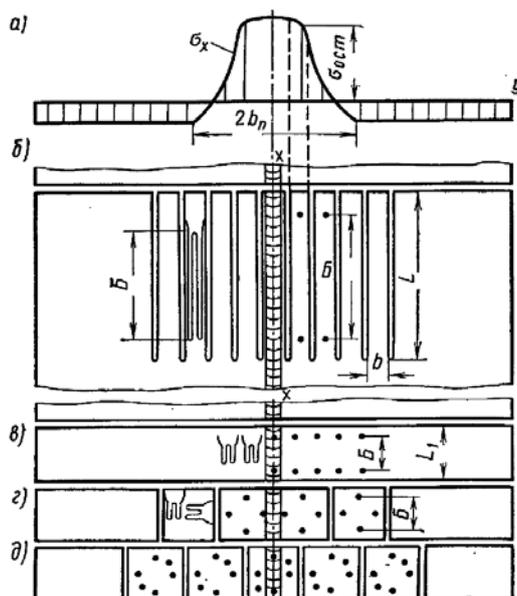


Рис. 3. Расположение мерительных баз и тензодатчиков при определении остаточных сварочных напряжений:
а – одноосные напряжений σ_x в пластине; б – разрезка на полосы;
в – вырезка поперечной полосы; г – разрезка на квадраты с измерением в двух направлениях;
д – разрезка на квадраты с измерением в трех направлениях вблизи шва

Основными физическими методами, применяемыми для измерения остаточных напряжений в металлах, являются:

- Рентгеновские
- Ультразвуковые
- Электромагнитные
- Метод твердости
- Метод хрупких покрытий

Рассмотрим кратко каждый из этих методов с позиции его преимуществ и недостатков при измерении остаточных напряжений при сварке толстостенных конструкций из закаливающихся судостроительных сталей.

Как известно, для таких сталей, ввиду протекания при охлаждении фазовых превращений, в общем случае формируется многофазная структура, в зависимости от зоны шва изменяются размеры зерна и схема кристаллизации. Это говорит о существенной неоднородности материала в сварном шве и околошовной зоне [6].

Рентгеновские методы основаны на прецизионном измерении изменений межплоскостных расстояний, определяемых по смещению дифракционной линии. Этот метод обеспечивает достаточно большую точность и позволяет измерять остаточные напряжения в изделиях сложной конфигурации, обладает высокой локальностью на глубине до 0,1 мм. С его помощью можно определять также градиенты напряжений [7].

К недостаткам рентгеновского метода следует отнести существенное влияние структуры и размеров зерна, что особенно критично для рассматриваемого случая. Для исследования подповерхностных слоев требуется удаление слоя металла, что делает его неприемлемым для неразрушающего контроля толстостенных конструкций [7]. Измерения занимают много времени (до 10 минут на точку), предъявляются высокие требования к чистоте поверхности. Непосредственно измеряемой в дифрактометре величиной является смещение дифракционного профиля, которое есть следствие напряженно-деформированного состояния исследуемого материала. Эта величина

составляет доли градуса, и должна измеряться с погрешностью, не превышающей сотые доли градуса [8]. Это возможно либо в лабораторных условиях, либо с применением высокоточных механических систем для перемещения измерительного прибора, что усложняет применение для крупногабаритных конструкций. Кроме того, их использование связано с возникновением рентгеновского излучения, а оборудование достаточно дорого.

Ультразвуковые методы основаны на применении эффекта изменения скорости распространения звуковых волн в металле, в котором имеются остаточные напряжения. Связь скорости распространения ультразвука с параметрами напряженно-деформационного состояния можно установить как экспериментально (при тарировке), так и расчетными методами. Вид зависимости скорости звука от напряжений – нелинейный, поэтому для расчета применяется уравнения пятиконстантной теории упругости с использованием модулей нелинейной упругости Мурнагана [9]. Эти методы позволяют оценивать компоненты двухосного напряженного состояния в поверхностном слое и средние по глубине до 150 мм [10]. Они не предъявляют жестких требований к чистоте материала, оборудование устроено относительно просто и может быть мобильным [9, 10].

Существенным недостатком ультразвуковых методов является невозможность прямого независимого определения напряжений вдоль нескольких осей, а так же существенное влияние неоднородностей и дефектов в исследуемом металле.

Повысить локальность и точность ультразвуковых методов поверхностного контроля можно с применением лазерно-ультразвукового метода, основанным на применении оптоакустического преобразования. Этот метод также позволяет определить усредненные по толщине остаточные напряжения с применением мощных широкополосных акустических сигналов наносекундной длительности [11].

Электромагнитные методы позволяют определить одноосное напряженное состояние. Они основаны на изменении намагниченности под действием остаточных напряжений. Могут измеряться магнитная проницаемость, остаточная намагниченность, коэрцитивная сила, величина магнитострикции и другие магнитные параметры [9].

Их преимуществами являются простота и оперативность проведения измерений, невысокие требования к подготовке поверхности. Недостатки – высокие погрешности при работе с твердыми материалами и при небольших величинах деформации, применимость только к исследованию ферромагнетиков, чувствительность к величине немагнитного зазора между образцом и измерительным инструментом. Кроме того, глубина, на которой проводятся измерения, для отдельных методик достигает лишь 20...25 мм, а диаметр точки – около 3 мм, что говорит о малой степени локальности. Достаточно локально можно определять напряжения лишь на глубине 0,1...3 мм.

Метод твердости – достаточно прост в применении и основан на изменении твердости материала при действии в нем остаточных напряжений. Метод, несмотря на его простоту, практически не применяется, так как ввиду низкой точности позволяет лишь качественно определить характер распределения остаточных напряжений.

Метод хрупких покрытий применяют для определения наиболее нагруженных областей в металлическом изделии. Он состоит в нанесении на металл керамического покрытия и приложения нагрузки к образцу до появления в нем трещин. При этом нанесенные заряженные частицы порошка скапливаются в трещинах, обеспечивая их видимость. Позволяет визуализировать поле напряжений, но не дает точных количественных оценок их величины [7].

Существуют также другие методы, менее широко распространенные в силу определенных причин (недостаточная проработка, малая точность), связывающие остаточные напряжения с удельной электропроводностью [12], с применением покрытий из прозрачных сред и использованием оптических методов и другие. Но на сегодняшний день эти методы либо не удовлетворяют предъявленным требованиям по точности, быстрдействию и другим, либо находятся на стадии разработки.

Общим же недостатком всех физических методов является их относительность. Это вызывает необходимость проведения тарировки на образцах, идентичных рассматриваемым, что не только снижает быстрдействие, но вносит неточности, связанные с различием структуры основного металла, обычно используемого для тарировки, с металлом сварного шва.

На основе изложенных фактов, можно сделать вывод о том, что ни один метод в отдельности при нынешнем уровне развития методик не позволяет оперативно определять остаточные напряжения в зоне 2 (см. рис. 1) с достаточной точностью и без разрушения конструкции. Это приводит к необходимости применения для решения конкретной задачи, а именно контроля снижения остаточных напряжений по результатам операции их удаления, применять несколько методов. Наиболее перспективным видится производство тарирования физических методов (например, ультразвукового) по результатам разрушающего контроля механическими. Таким образом, можно получать с определенной точностью оценку значений остаточных напряжений неразрушающими методами и использовать ее, например, для определения эффективности методов снижения остаточных напряжений в реальных сварных конструкциях.

Литература

1. Кузьминов С. А. Сварочные деформации судовых корпусных конструкций – Л.: Судостроение, 1974 г.
2. Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций – М.: Высшая школа, 1982. – 272 с.
3. Бигер И. А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 233 с.
4. Гатовский К. М. Теория сварочных напряжений и деформаций. – Ленинград: изд. Ленинградского Ордена Ленина кораблестроительного института, 1980. – 331 с.
5. Винокуров В. А. Сварочные деформации и напряжения. Методы их устранения – М.: Машиностроение, 1968 г. – 236 с.
6. Теория сварочных процессов: Учебник для вузов. / Под ред. В. В. Фролова. – М.: Высшая школа, 1988 г. – 559 с.
7. Экспериментальная механика. / Под ред. А. Кобаяси. Перевод с английского под ред. Б. Н. Ушакова. – М.: Мир, 1990 г. – 552 с.
8. Трофимов В. В., Башкарев А. Я., Краус Иво. Неразрушающий метод рентгеновской тензометрии для контроля напряжений в поверхностных слоях деталей и изделий. / Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Чешский университет (г. Прага). Опубликовано на сайте механико-машиностроительного факультета СПбГУ: www.mmf.spbstu.ru/konf_2011/38.pdf
9. Никитина Н. Е., Казачек С. В. Преимущества метода акустоупругости для неразрушающего контроля механических напряжений в деталях машин // Вестник научно-технического развития. 2010. № 4(32) С. 18 – 28.
10. Интернет – сайт <http://www.encotes.ru> компании ООО «ИНКОТЕС».
11. В. А. Быченко. Лазерно-ультразвуковая диагностика остаточных напряжений в тонкостенных элементах изделий ракетно-космической техники // изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, №7.

12. *Васильков С. Д.* Разработка и исследование метода неразрушающего контроля остаточных напряжений в металлах и сплавах и его метрологическое обеспечение. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики. СПб.: «Университетские телекоммуникации», 2010 г. – 24 с.

УДК 621.375.826

ОЦЕНКА ОБЛАСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ СОВМЕЩЁННЫМИ ТЕПЛОВЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

Хтет Аунг Лин

*Аспирант 1 года,
кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: А.И. Мисюров,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в
машиностроении»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

В настоящее время в промышленности находит все более широкое применение лазерная сварка. Высокая концентрация энергии в пятне нагрева обеспечивает высокую производительность и качество изделий. Использование дополнительного теплового источника позволяет повысить эффективность процесса лазерной сварки [1]. Реализация преимуществ достигается при регулировании взаимного положения тепловых источников, имеющих различную распределённость плотности мощности.

Высокая сложность процессов создаёт сложности в выборе оптимальных режимов с использованием технологических экспериментов. Применение методов компьютерного моделирования позволяет упростить выбор оптимальных параметров обработки. Для расчетов использовали модель, разработанную в МГТУ им. Н.Э. Баумана совместно с Санкт-Петербургским государственным техническим университетом [2].

В работе исследовали влияние толщины свариваемого металла с различными теплофизическими свойствами на эффективность процесса гибридной сварки. Для этого проводили расчет сварки пластин из стали типа 30ХГСА ($\lambda_t = 0,32$ Вт/(см·К)) и стали типа Х18Н9 ($\lambda_t = 0,163$ Вт/(см·К)) различной толщины: 0,6 и 100 мм.

На первом этапе расчет и проводили для случая сварки стали 30ХГСА толщиной 0,6 (рис. 1) и 100 мм (рис. 2). Изменяли мощность дополнительного источника тепла в диапазоне 2-8 кВт и его положение относительно центра лазерного луча в диапазоне от -1 до +1 см при условии полного провара пластины. Скорости сварки составляла 1, 3 и 5 см/с. За счет использования дополнительного источника тепла можно уменьшить мощность лазерного излучения. Это свидетельствует о повышении эффективности лазерного воздействия.

На втором этапе расчет и проводили для случая сварки стали типа Х18Н9, имеющей более низкий коэффициент теплопроводности по сравнению с 30ХГСА. Получен аналогичный результат (рис. 3, 4).

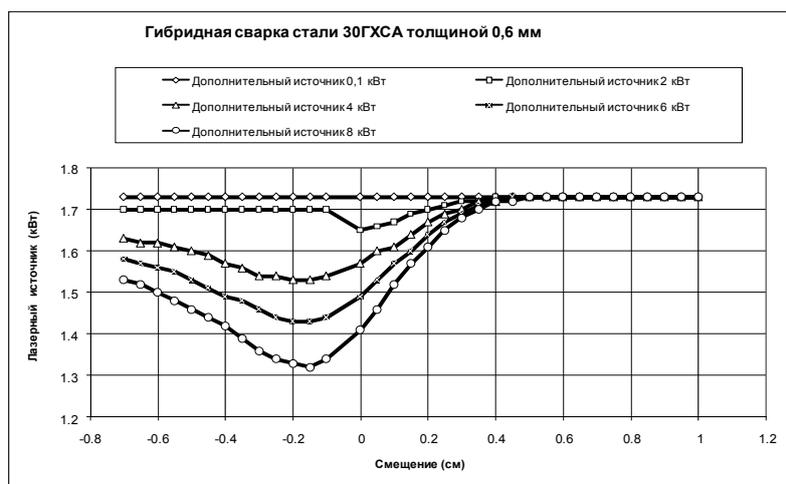


Рис. 1. Изменение мощности лазерного источника тепла в зависимости от мощности дополнительного источника и его положения относительно центра лазерного луча при гибридной сварке стали 30ХГСА толщиной 0,6 мм, $V_{св} = 5$ см/с

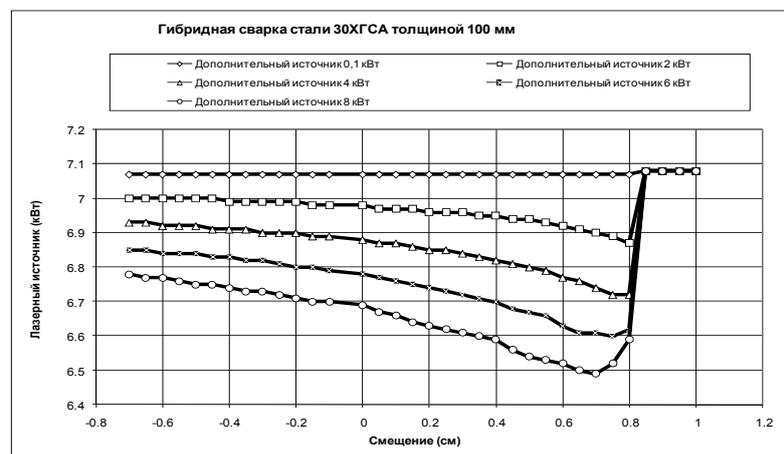


Рис. 2. Изменение мощности лазерного источника тепла в зависимости от мощности дополнительного источника и его положения относительно центра лазерного луча при гибридной сварке стали 30ХГСА толщиной 100 мм, $V_{св} = 5$ см/с

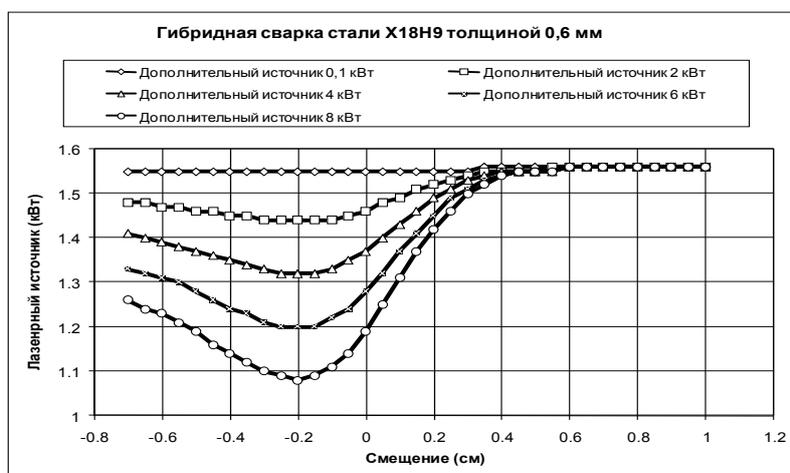


Рис. 3. Изменение мощности лазерного источника тепла в зависимости от мощности дополнительного источника и его положения относительно центра лазерного луча при гибридной сварке стали X18Н9 толщиной 0,6 мм, $V_{св} = 5$ см/с

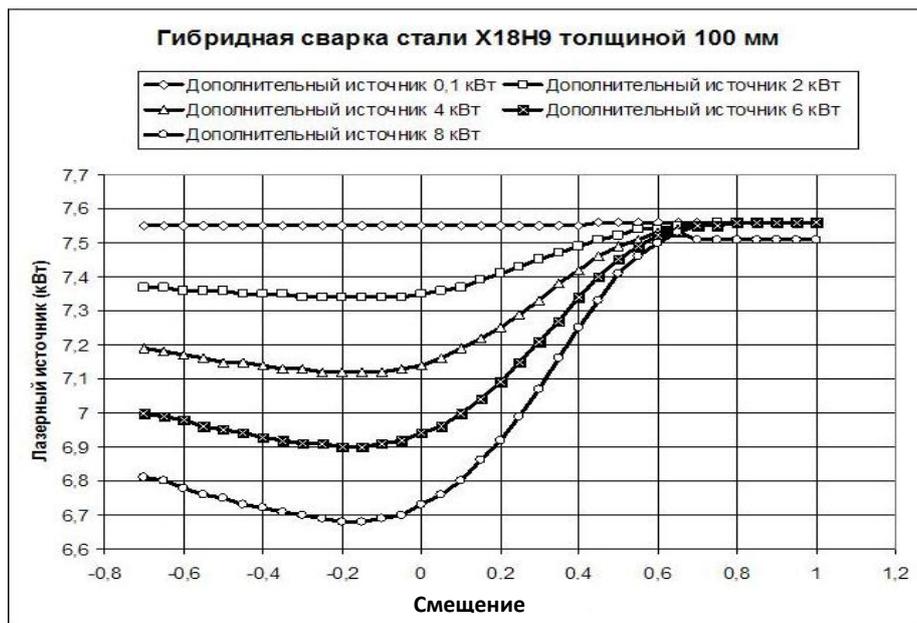


Рис. 4. Изменение мощности лазерного источника тепла в зависимости от мощности дополнительного источника и его положения относительно центра лазерного луча при гибридной сварке стали X18H9 толщиной 100 мм, $V_{св} = 5 \text{ см/с}$

Эффективность процесса гибридной лазерной сварки оценивали следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{P_{л.и}(\text{max}) - P_{л.и}(\text{min})}{P_{л.и}(\text{max})} * 100\%$$

где ε = эффективность;

$P_{л.и}(\text{max})$ = максимальная мощность лазерного излучения, определенной данного расчета;

$P_{л.и}(\text{min})$ = минимальная мощность лазерного излучения, определенной данного расчета.

Анализ полученных результатов показал, что с увеличением толщины свариваемого металла эффективность процесса существенно снижается. Так на толщине 0,6 мм для стали 30ХГСА на скорости 5 см/с эффективность процесса повышается на 23, а для 100 мм только на 8 %. Увеличение скорости сварки малых толщин приводит к снижению эффективности процесса (рис. 5). На больших толщинах наблюдается обратная зависимость (рис. 6).

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что наибольшая эффективность процесса гибридной лазерной сварки достигается на малых толщинах. Это справедливо в широком диапазоне скоростей обработки и мощностей дополнительного источника тепла для сталей, имеющих различную теплопроводность (30ХГСА и X18H9).

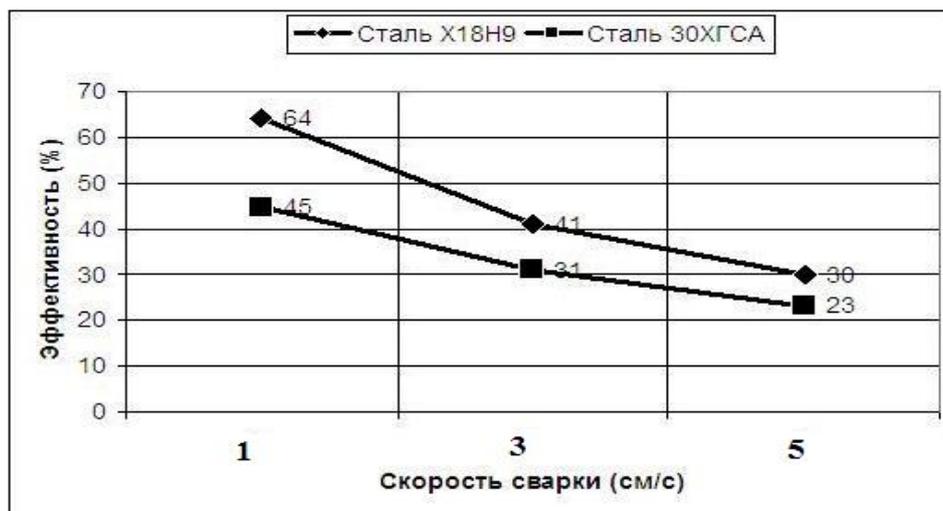


Рис. 5. Изменение эффективности при гибридной сварке стали 30ХГСА и стали X18H9 толщиной 0,6 мм в зависимости от скорости сварки

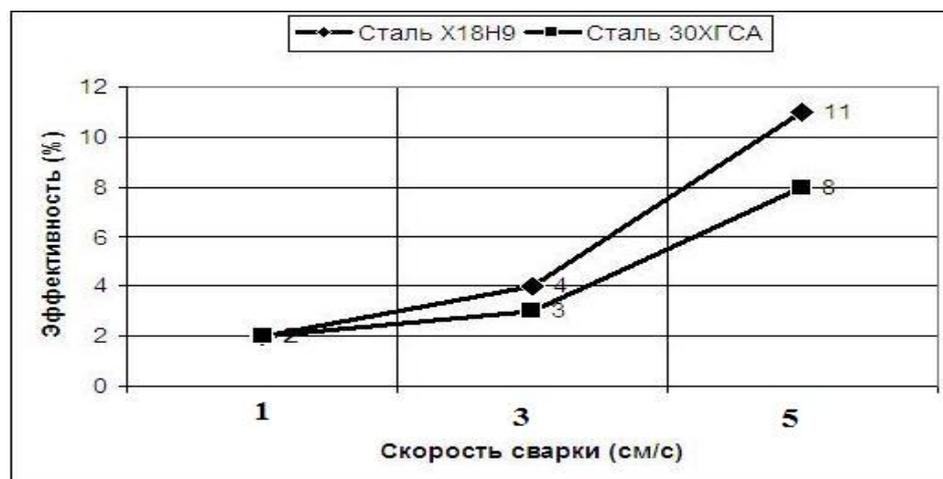


Рис. 6. Изменение эффективности при гибридной сварке стали 30ХГСА и стали X18H9 толщиной 100 мм в зависимости от скорости сварки

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, 2008. – 664с.
2. Алексеев Г.М., Туричин Г.А., Мисюров А.И. и др. Перспективы применения светолазерных технологий. Автоматическая сварка, №5, 2005, с. 5-11.

УДК 538.911

АНАЛИЗ ПОВЕРХНОСТИ ТОНКИХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ТЕЛЛУРИДА ВИСМУТА ПОЛУЧЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ОСАЖДЕНИЕМ

Александр Евгеньевич Шупенев⁽¹⁾, Юрий Михайлович Миронов⁽²⁾

Магистрант 1 года⁽¹⁾, аспирант⁽²⁾,

кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.И. Мисюров,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в

машиностроении»,

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Современные тенденции миниатюризации в электронике и технике приводят к необходимости поиска новых способов обеспечения эффективного теплоотвода нагреваемых элементов конструкции, выдвигая все более жесткие технологические ограничения для конструкций теплообменников. Открытый в 1834 году эффект Пельтье, заключающийся в выделении или поглощении тепла при прохождении электрического тока в месте контакта (спая) двух разнородных проводников позволил создать термоэлектрические модули, применяемые в настоящее время во многих областях техники и электроники. Термоэлектрические модули на основе эффекта Пельтье обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными устройствами теплоотвода: отсутствие подвижных частей, возможность миниатюризации, возможность охлаждения до сверхнизких температур и другие. Однако встает вопрос о повышении термоэлектрической эффективности работы данных модулей.

Полупроводниковые материалы на основе теллурида висмута Bi_2Te_3 широко используются в термоэлектрических преобразователях энергии, холодильниках, термостатах благодаря высоким значениям термоэлектрической эффективности [1]. В современных твердотельных термоэлектрических преобразователях энергии используются преимущественно объемные материалы. Интерес к тонким и сверхтонким пленкам указанных полупроводников обусловлен перспективами создания миниатюрных устройств с более высокими функциональными возможностями. Локальное охлаждение или нагревание происходит приблизительно в $2 \cdot 10^4$ раз быстрее, чем в устройствах, созданных на основе объемных материалов [2]. Получение тонких пленок Bi_2Te_3 традиционным методом термического испарения в вакууме наталкивается на трудности, связанные с высоким парциальным давлением паров халькогена. Из-за потери легколетучего компонента вследствие реиспарения атомов халькогена с поверхности растущей пленки при относительно высоких температурах ($T \geq 300^\circ \text{C}$) пленки имеют худшие электрические параметры по сравнению с монокристаллами. При более низких температурах роста пленки имеют, как правило, поликристаллическую структуру [2].

Метод импульсного лазерного осаждения выгодно отличается от термических методов непрерывного осаждения тонких пленок полупроводников. Наличие большой доли возбужденных атомов и ионов позволяет понизить температуру эпитаксиального роста, а высокая скорость образования зародышей позволяет осаждать чрезвычайно

тонкие сплошные пленки (единицы нанометров). Кроме того, поскольку за один импульс испаряется незначительная масса вещества мишени, можно достаточно точно контролировать толщину пленки количеством лазерных импульсов. Качество полученных методом лазерной абляции пленок сопоставимо с качеством пленок, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии [2].

По сравнению с магнетронным и электронно-лучевым способами метод лазерного импульсного испарения имеет в несколько раз меньшую производительность, что объясняется низкой средней скоростью из-за большой скважности импульсов. Увеличить же производительность можно путем увеличения площади испарения при сохранении плотности мощности излучения, а также увеличением частоты излучения. В то же время преимущества, присущие лазерному методу испарения: сохранение стехиометрического состава испаряемого вещества при переносе его на подложку, высокие импульсные скорости осаждения при возможности регулирования в широком диапазоне энергии частиц пара – дают широкие возможности для использования данного метода при формировании наноразмерных тонкопленочных покрытий.

Принцип работы оборудования для импульсного лазерного осаждения заключается в следующем. Лазерный луч попадает в вакуумную камеру через кварцевое окно и воздействует на мишень из осаждаемого материала. Взаимодействие высокоэнергетического лазерного импульса с материалом мишени приводит к образованию целого ряда продуктов, среди которых присутствуют не только электроны, ионы и нейтральные частицы, но и твердые микрочастицы материала мишени, отрывающиеся при взрывообразном испарении материала. Образованная плазма распространяется нормально к поверхности мишени и достигает керамической подложки, осаждаясь в виде тонкой пленки испаренного материала. Для равномерности испарения и осаждения, подложке и мишени придаются вращательные движения, а также производится нагрев подложки.

В МГТУ им. Н. Э. Баумана ведутся работы по получению тонких термоэлектрических пленок методом импульсного лазерного осаждения. Источником лазерного излучения служит эксимерный Kr-Лазер с длиной волны лазерного излучения 248 нм, максимальной энергией до 400 мДж, длительностью импульса 30нс, частотой следования импульсов до 10 Гц. В качестве мишеней использовались таблетки из прессованного порошка теллурида висмута. Эксперименты проводились в высоком вакууме (10^{-8} торр), при различных энергетиках лазерного излучения, при различных температурах подложки.

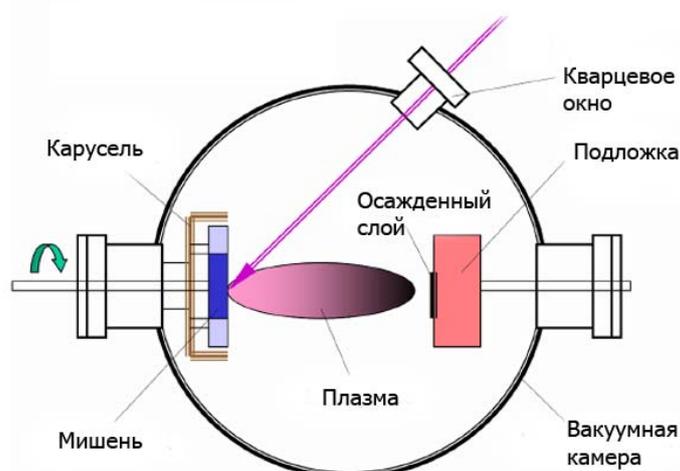


Рис. 1. Схема оборудования для импульсного лазерного паро-фазного осаждения



Рис. 2. Платформа Нанофаб-100, модуль импульсного лазерного осаждения



Рис. 3. Платформа Нанофаб-100, модуль СВВ ФИП

Морфологические исследования поверхности осажденных пленок Vt_2Te_3 проводились на сверхвысоковакуумном модуле с колонной фокусированных ионных пучков (СВВ ФИП). Особенности состояния поверхностного слоя осажденных пленок, безусловно, зависят от толщины осажденного материала [1]. Поэтому начальными измерениями служили измерения толщины осадения слоя при различных температурно-энергетических параметрах процесса осадения.

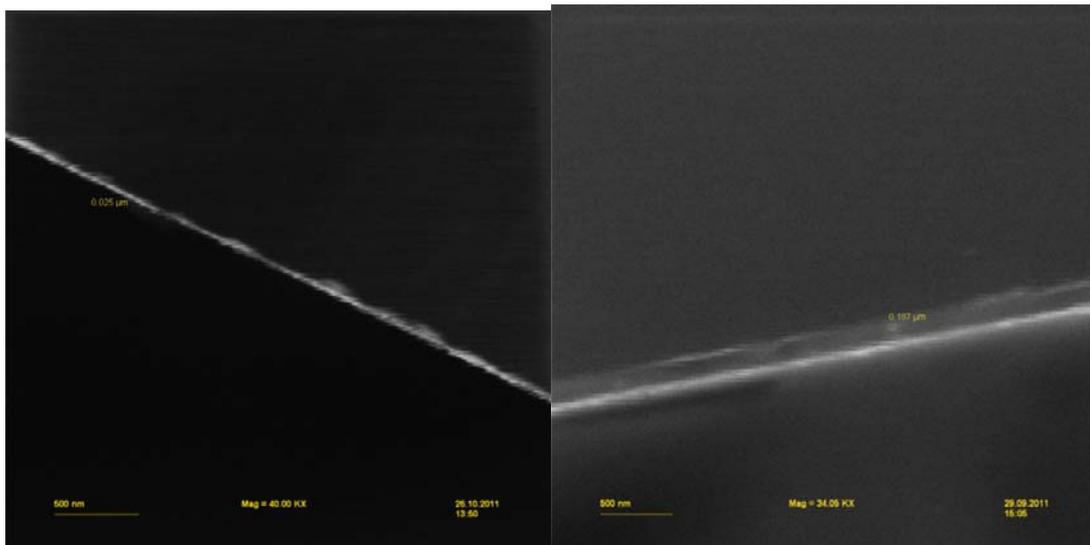


Рис. 4а. Толщина пленки Bi_2Te_3 осажденной при расстоянии $H=15\text{мм}$, температуре нагревателя $T=20^\circ\text{C}$ (справа, $\times 4000$), $T=400^\circ\text{C}$ (слева, $\times 4000$)

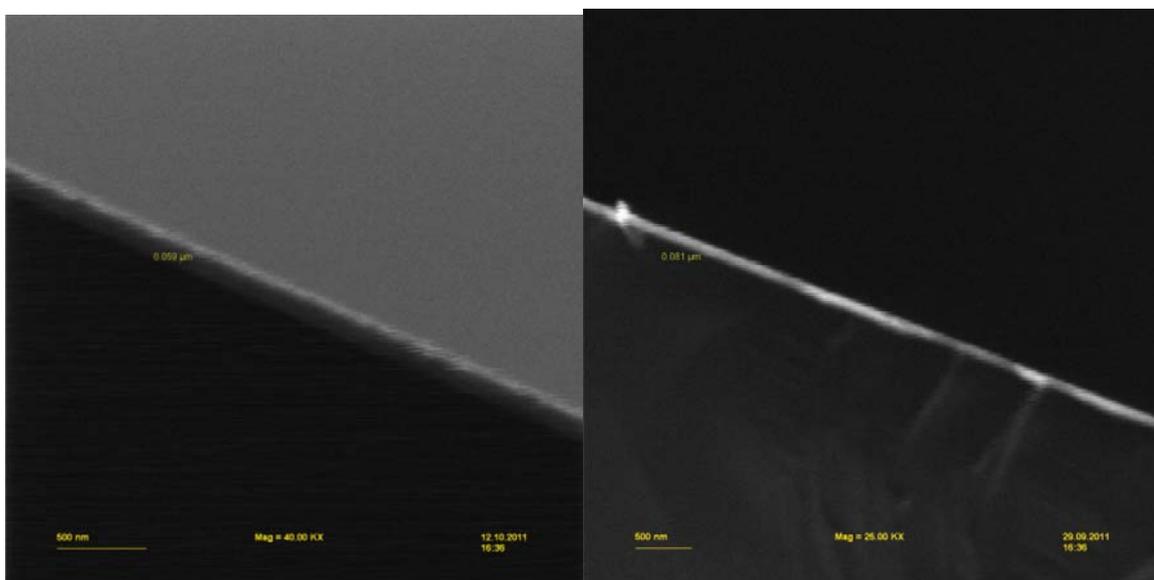


Рис. 4б. Толщина пленки Bi_2Te_3 осажденной при расстоянии $H=50\text{мм}$, температуре нагревателя $T=20^\circ\text{C}$ (справа, $\times 4000$), $T=400^\circ\text{C}$ (слева, $\times 2500$)

Измерения толщины осажденного слоя проводились в оптическом и электронно-оптическом режиме в торец свежего скола. Скол производился перпендикулярно поверхности осажденного слоя приблизительно посередине полученного образца. На каждый образец производилось определенное количество измерений, в результате чего подсчитывалось среднее значение. Приведены примеры измерений.

По полученным данным построена зависимость толщины осажденного слоя от температуры нагревателя при постоянной энергетике лазерного излучения на различных расстояниях мишени от подложки. Зависимость имеет экстремальный характер с пиком для обоих случаев положения подложки в области температуры нагревателя 400°C . Дальнейшее уменьшение толщины осаждаемого слоя, возможно, объясняется усилением эффекта термического испарения атомов теллурида висмута с нагретой подложки.

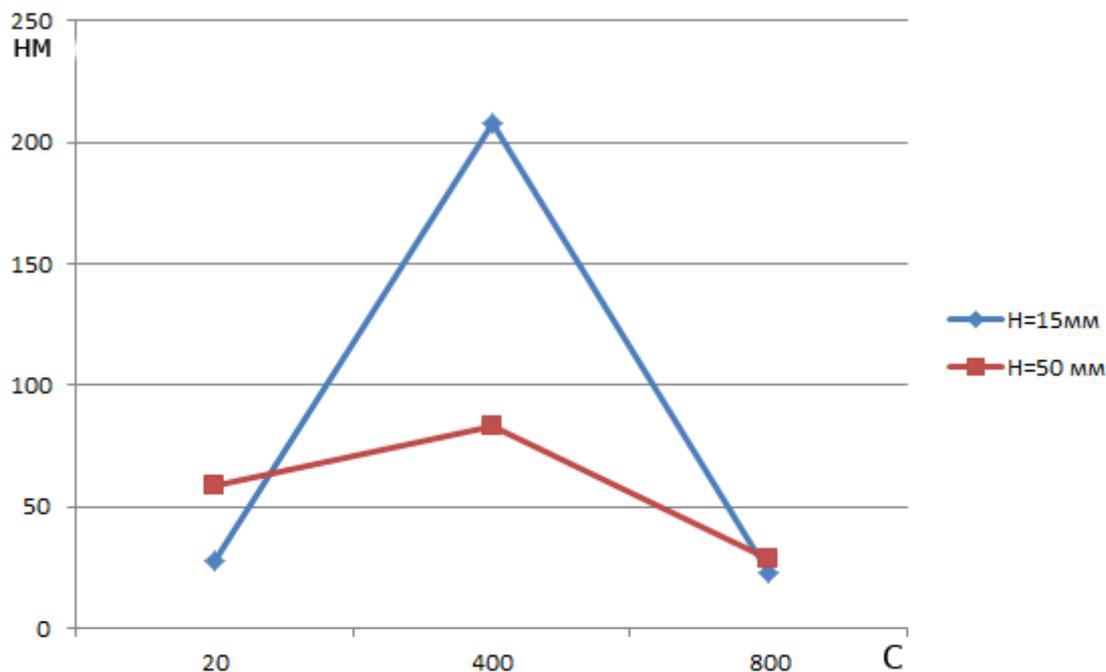


Рис. 5. Зависимость толщины осажденного слоя Bi_2Te_3 от температуры нагревателя

Морфологические исследования состояния поверхности осажденных пленок Bi_2Te_3 проводились также на сверхвысоковакуумном модуле с колонной фокусированных ионных пучков (СВВ ФИП).

Представлен внешний вид поверхности пленок осажденных при различных температурах. Температура нагревателя варьировалась в пределах от 20 до 800 градуса Цельсия. Стрелками отмечены участки с нарушенным стехиометрическим составом. Отмечается уменьшение частоты образования дефектных участков с увеличением расстояния между подложкой и мишенью.

Для изучения нанорельефа поверхности тонких пленок использовались сверхвысоковакуумный сканирующий зондовый микроскоп JEOL JSPM 4610 и зондовый микроскоп NtegraSpectra. Анализ проводился для различных расстояний между мишенью и подложкой. Сканировался участок поверхности образца $5 \times 5\text{ мкм}$ зондовым методом, в результате чего фиксировалась величина шероховатости. Средние значения шероховатости пленок составляют порядка 2 нм при толщине осажденного слоя 100 нм. Отмечается снижение шероховатости поверхностного слоя осажденного слоя с увеличением расстояния между мишенью и подложкой. Так, расстоянию $H=15\text{ мм}$ соответствует средняя шероховатость 2 нм, а расстоянию $H=50\text{ мм}$ соответствует значение средней шероховатости 18 нм. Возможным объяснением данного эффекта является уменьшение средней энергии осаждаемых на подложку частиц теллурида висмута с увеличением пути пролета осаждаемых частиц, вследствие чего снижается количество и размеры образуемых ими кластеров.

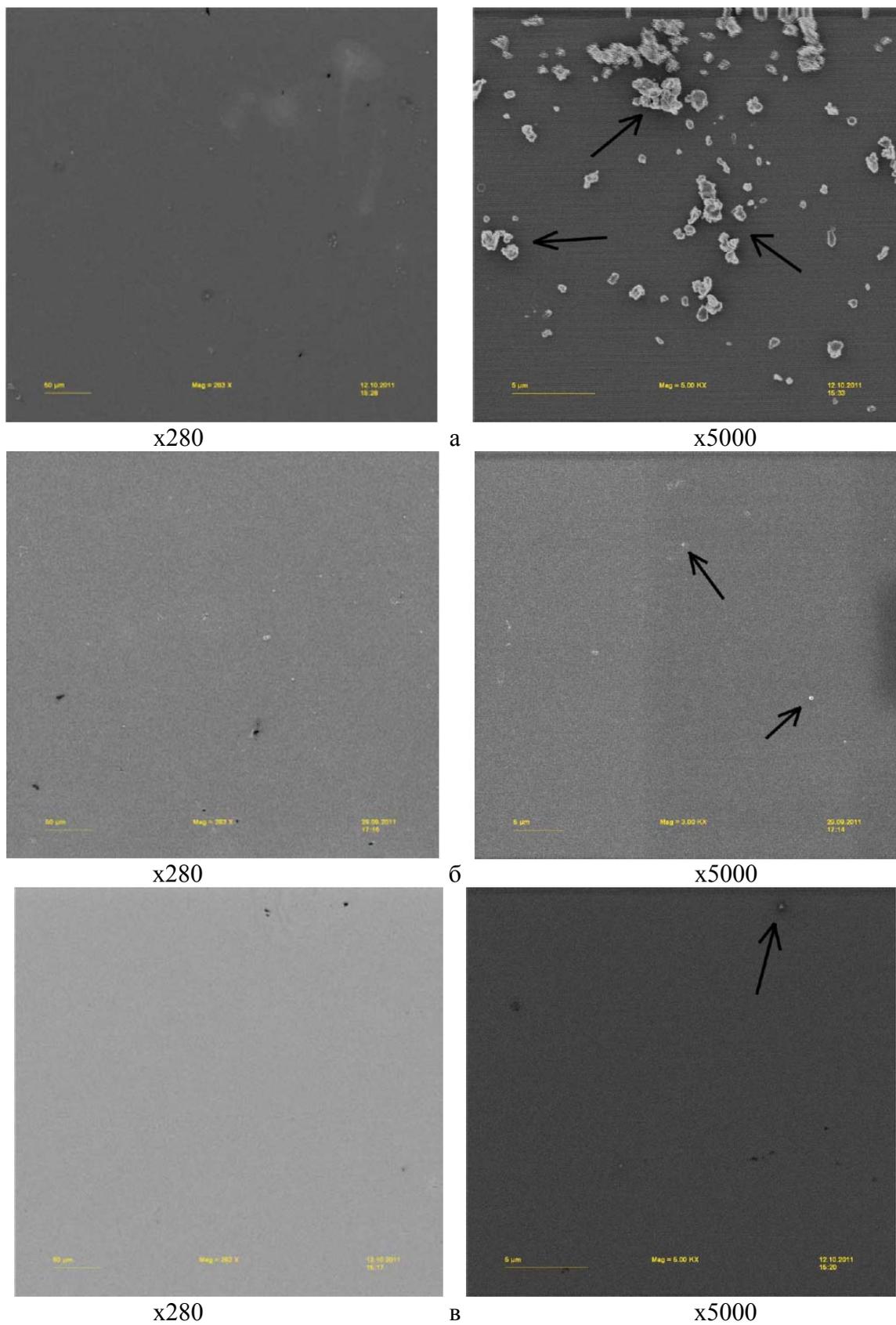


Рис. 6. Поверхность пленки Bi_2Te_3 осажденной при различных температурах нагревателя:
a — $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$; *б* — $T=400\text{ }^{\circ}\text{C}$; *в* — $T=800\text{ }^{\circ}\text{C}$

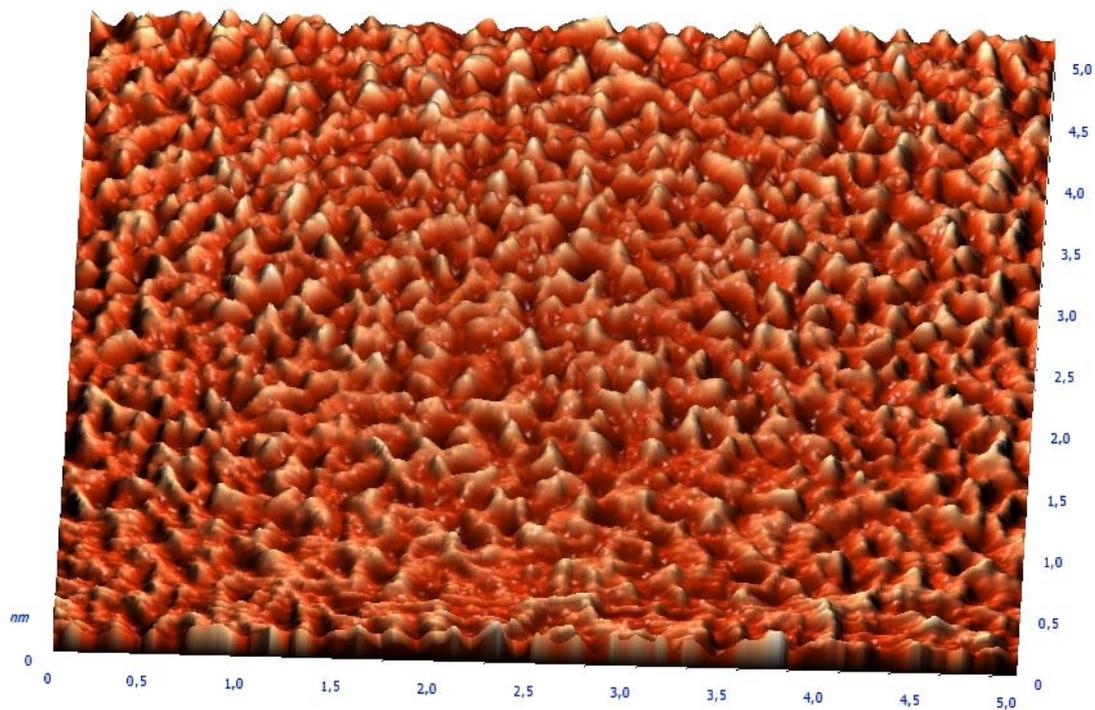


Рис. 7. Поверхность пленки Bi_2Te_3 осажденной при температуре нагревателя $T=400^\circ\text{C}$, расстоянием между мишенью и подложкой $H=15\text{мм}$

Литература:

1. Б.М. Гольцман, В.А. Кудинов, И.А. Смирнов, Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi_2Te_3 . М.: Наука, 1972.
2. И.С. Вирт [и др] Физика и техника полупроводников /Осаждение тонких пленок Bi_2Te_3 и Sb_2Te_3 методом импульсной лазерной абляции/, 2010. т.44.

Секция №13
Реновационные технологии

УДК 620.179.112

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И КАЧЕСТВА КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ДОРНОВАНИЯ И РЕДУЦИРОВАНИЯ

Анастасия Вячеславовна Бодарева

*Аспирант 1 года,
кафедра «Технологии обработки материалов»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: А.Л. Воронцов,
доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии обработки материалов»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

В современном автомобилестроении до 90 % всех деталей изготавливают методами обработки металлов давлением, причем наиболее применяемым методом по праву является холодная объемная штамповка.

Широкое применение объясняется тем, что в процессе обработки не требуется проводить предварительный нагрев заготовки, что значительно улучшает качество поверхности получаемых изделий из-за полного отсутствия окалинообразования. В большинстве случаев холодная объемная штамповка является малоотходным процессом, имея высокий коэффициент использования металлов (порядка 90 %). При холодной объемной штамповке резко повышается точность формообразования вследствие отсутствия значительных температурных деформаций заготовки и инструмента, а так же повышается производительность, сводя время получения деталей к секундам и даже долям секунды. Процесс холодной объемной штамповки сравнительно легко поддается автоматизации, улучшает условия и безопасность производства. К преимуществам следует отнести и тот факт, что после холодной объемной штамповки не требуется применение операций резания для доводки изделий.

В последнее время интенсивное развитие получили методы редуцирования и дорнования, обладающие широкими технологическими возможностями и высокими технико-экономическими показателями. Редуцирование относится к числу высокоэффективных процессов получения полых ступенчатых деталей типа втулка. Комбинирование методов дорнования и редуцирования основано на совмещении обработки отверстия дорном с редуцированием наружной поверхности жесткой фильерой.

Процессу свойствен ряд особенностей – фильера имеет такую внутреннюю поверхность, что наружная поверхность отверстия получает после обработки свойства внутренней поверхности фильеры при высокой точности и малой высоте неровностей.

Дорнование традиционно связывается с обработкой металлов резанием и специалистам в области обработки металлов давлением известно мало, поскольку его рассмотрение не входит ни в учебный курс «Технологияковки и объемной штамповки», ни в учебный курс «Технология листовой штамповки». Термин «дорнование» ни разу не упомянут ни в учебнике, ни в учебном пособии, ни в капитальных справочниках по холодной обработке металлов давлением. Правда, в листовой штамповке рассматривается очень близкий к дорнованию тонкостенных заготовок процесс раздачи. Но, во-первых, молодой специалист, не зная первого термина, не видит и связи этих понятий друг с другом. Во-вторых, назначение этих операций существенно различно: дорнование предназначено прежде всего для калибровки и улучшения качества самого отверстия, а раздача – для получения требуемой формы всего изделия и значительного (намного больше калибровки)

увеличения его наружного и внутреннего диаметров, причём, как правило, лишь в концевой части, а не по всей длине.

В академической теории пластичности наибольшее внимание уделяется математической строгости решения задачи. Для того чтобы можно было получить достаточно строгое решение, часто принимается, например, полное отсутствие контактного трения или, наоборот, условие полного прилипания, практически никогда не соответствующие реальным процессам обработки давлением. Во многих случаях академические решения приводят либо к громоздким и сложным математическим выражениям, либо к необходимости численного решения полученных уравнений. Очевидно, полагаясь на строгость математики, авторы академических решений, соответствующих своими названиями известным процессам обработки давлением, практически никогда не делают их экспериментальную проверку путём сопоставления с имеющимися опытными данными.

Многие попытки применения отдельных академических решений для расчёта реальных процессов обработки давлением дают неудовлетворительные результаты. Этому в немалой степени способствует то, что подавляющее большинство университетских теоретиков начиная со студенческой скамьи имеет дело лишь с принятыми в академических кругах абстрактными схемами технологических операций, весьма далёкими от реальности. А как сказал А. Ляв, «важный факт состоит в том, что наиболее крупные успехи в естествознании были достигнуты людьми, которые были хорошо знакомы с практическими требованиями». Чтобы создать полноценную для практики теорию процесса обработки металлов давлением, надо хорошо разбираться в кузнечно-прессовом оборудовании, используемом для осуществления процесса, знать технологические режимы, конструкцию применяемой штамповой оснастки, а также специфику конкретных изделий, получаемых с помощью данного процесса. Без этого теоретик не сможет дать полезные ответы именно на те вопросы, которые стоят перед технологом-практиком.

Тут уместно напомнить известные слова академика А.Н. Крылова, сказанные им про теоретиков, берущихся писать о строительной механике корабля: «В применении к кораблю необходимо «знать корабль», поэтому многие математические весьма изящные теории оказываются неприменимыми на практике, ибо их авторы не знали корабль и что на корабле надо делать и чего делать нельзя».

По указанным причинам, несмотря на то, что в академической теории пластичности получены решения задач с названиями «осадка», «прессование», «выдавливание», «волочение» и т.п., ни одно из этих решений не нашло практического применения при проектировании процессов обработки давлением.

Если для академического теоретика важны такие проблемы как, например, доказательство единственности решения, то теоретика обработки давлением подобные проблемы не интересуют вовсе. Все усилия последнего сосредоточены на получении решения пусть не строгого и не единственного, но зато адекватного закономерностям реальных технологических процессов, учитывающего все значимые влияющие факторы, дающего хорошую точность практических расчётов и удобного для использования.

Достоинствами теоретических методов исследования процессов обработки металлов давлением являются, во-первых, получаемые в ходе решения функциональные зависимости, позволяющие выявить физическую причину влияния тех или иных факторов на исследуемые параметры процесса и тем самым способствующие его целенаправленному совершенствованию, а во-вторых, выводимые

расчётные формулы (математические модели), обеспечивающие проектирование типовых технологических процессов с большой быстротой и малыми финансовыми затратами. Поэтому разработка теоретических методов получения аналитических зависимостей, точность которых достаточна для практики, по-прежнему остается важной и актуальной задачей теории обработки металлов давлением.

Основной задачей большинства известных теоретических исследований процессов обработки давлением являлось определение силы деформирования в зависимости от обжатия, контактного трения, формы инструмента и напряжения текучести. В последнее время стало актуальным решение значительно более сложных задач, связанных, например, с определением распределения механических свойств в получаемом изделии или с прогнозированием разрушения. Для этого необходимо определение напряжений и накопленных деформаций во всех точках пластической области. А для процессов выдавливания, приводимых далее в качестве иллюстрации применения рассматриваемых теоретических методов, определение этих характеристик необходимо и для вычисления максимального давления на стенку матрицы, используемого для обоснованного расчёта матрицы на прочность.

Для надёжного достижения поставленной цели теоретического исследования необходимо чётко представлять принципиальные возможности тех или иных общих теоретических методов, их возможную точность, достоинства и недостатки. В связи с этим проведём краткий общий анализ основных методов исследования, используемых в теории обработки металлов давлением. При необходимости более подробный критический анализ известных решений конкретных задач будет изложен в соответствующих разделах последующих глав. Последовательность решения наиболее известными теоретическими методами с приведением конкретных примеров излагаться не будут, поскольку заинтересованные читатели могут самостоятельно ознакомиться с этими материалами по известным учебникам по теории обработки металлов давлением.

Следует отметить, что в фундаментальной теории пластичности Д.Д. Ивлевым выполнено обобщение теории линий скольжения на пространственные задачи. Однако все решения методом линий скольжения и методом верхней оценки с помощью жёстких блоков (приближенным энергетическим методом), полученные в теории обработки давлением, основаны на уравнениях плоской задачи и распространяются на осесимметричные задачи объёмной штамповки бездоказательно. Например, А.Д. Томлёновым в работе осуществлялось теоретическое исследование выдавливания сферическим пуансоном. Методом линий скольжения решалась плоская задача с принятием нулевого трения по матрице, то есть сферический пуансон был заменён на радиусный, а реальный коэффициент трения не учитывался. Для того чтобы распространить полученное решение плоской задачи на осесимметричную, А.Д. Томлёнов в одном месте вводит грубое допущение о том, что напряжённые состояния в обоих случаях будут одинаковыми, а в другом месте предлагает считать, что удельная сила осесимметричного выдавливания равна удвоенной удельной силе плоского выдавливания.

Рассматриваемыми методами трудно учесть неопредельное контактное трение и упрочнение материала, а практическое использование их результатов сводится, по существу, к решению каждой раз частной задачи с грубыми допущениями и большим объёмом построений и вычислений. Надёжность и точность получаемых при этом расчётных зависимостей, бездоказательно распространяемых на осесимметричную деформацию, весьма невысоки.

Инженерный метод предназначен для определения нормальных напряжений только на контактной поверхности заготовки и инструмента. Это позволяет использовать всего одно уравнение равновесия и заменять в нём частные производные

обыкновенными. Иногда, вместо использования классического уравнения, выводят упрощённое уравнение равновесия, заменяя бесконечно малый элемент конечным в определённом направлении (метод тонких сечений). Инженерный метод является наиболее простым и наглядным из существующих, что способствует его наибольшему распространению. Однако простота метода во многих случаях не оправдывает следующие присущие ему недостатки, приводящие к непредсказуемой надёжности получаемых результатов и ограничениям задач, решаемых теоретическим исследованием.

Во-первых, в силу стремления к предельной простоте используемого математического аппарата, достигаемой отказом от учёта большинства уравнений общей теории пластичности, часто принимаются противоречащие друг другу исходные допущения, причём исследователи даже не подозревают об этом. Доказательность рассуждений подменяется псевдообоснованиями, плохо согласующимися друг с другом или с физикой процесса (как правило, это делается для прикрытия недостатков полученного решения).

Во-вторых, поскольку система допущений инженерного метода не связана ни с обеспечением кинематической возможности скоростей пластического течения, ни с обеспечением статической допустимости расчётных напряжений, то получаемую оценку силы деформирования нельзя заранее гарантированно отнести ни к верхней, ни к нижней. Например, формула для определения силы выдавливания цилиндрических стаканов, полученная инженерным методом в работе, даёт значения, примерно в 1,5 раза выше экспериментальных, а полученная тем же методом в работе – в 1,5 раза ниже.

В-третьих, инженерный метод принципиально не пригоден для получения формул распределения напряжений, скоростей течения и накопленных деформаций по объёму деформируемого тела, а также для определения формоизменения заготовки, размеров и формы очага пластической деформации.

Это часто вынуждает дополнять теоретические исследования, выполненные инженерным методом, сведениями, установленными экспериментально. Например, М.В. Сторожев, получив инженерным методом формулу для определения силы выдавливания цилиндрического стакана, вводит в неё экспериментальное значение высоты очага пластической деформации. Е.П. Унксов, исследуя осадку, также определяет экспериментально размер зоны, в которой касательные напряжения приняты линейно падающими до нуля. Однако это, во-первых, лишает теоретическое исследование цельности, а, во-вторых, вовсе не гарантирует надёжности полученных расчётных формул.

Во многих случаях точность вычислений по формулам, полученным инженерным методом, является невысокой, а сами формулы не отражают существенных физических особенностей реальных процессов деформирования.

В последнее время исключительно широко применяется метод конечных элементов, позволяющий найти перемещения, деформации и напряжения во всех узлах элементов, на которые разбита рассматриваемая среда.

Например, принимается наиболее простое предположение о линейной зависимости перемещений от координат рассматриваемой точки, после чего неизвестные коэффициенты функций перемещений выражаются через перемещения узловых точек элемента с помощью соответствующей системы уравнений. Используя соотношения для перемещений, выражают деформации, а затем и напряжения, которые будут, таким образом, являться функцией смещения узловых точек элемента. Затем

полученные зависимости подставляют в выражения для потенциальной энергии деформации, представляя её как функцию узловых смещений. Минимизируя далее функцию энергии, то есть беря частные производные от энергии по соответствующим узловым перемещениям, получают систему уравнений, определяющих искомые перемещения узлов, что и приводит к решению поставленной задачи.

Широта использования данного метода связана, во-первых, с тем, что он обладает универсальностью и позволяет решать достаточно сложные задачи, но в ещё большей степени обусловлена тем, что пользователи обычно применяют чужие программы, не требующие от них не только знания механики деформируемого твёрдого тела, но и понимания самой процедуры решения, выполняемой ЭВМ по той или иной программе метода конечных элементов. Последнее вызывает целый ряд негативных последствий, которые важно подробно рассмотреть.

Статьи, основанные на использовании метода конечных элементов, можно разделить на две категории. К сравнительно немногочисленной первой категории относятся статьи, написанные учёными, которые сами разрабатывают новые пакеты программ метода конечных элементов. Как правило, в этих статьях подробно и в доступной для большинства специалистов форме описывается, чем предлагаемый пакет программ метода конечных элементов отличается от других, обосновываются принятые упрощения, производится конкретное численное сопоставление результатов, полученных с помощью нового пакета, с результатами, полученными с помощью ранее известных программ. Кроме этого, надёжность и точность разработанного пакета программ подтверждается и сравнением с результатами подробно описанных экспериментов. В качестве примера приведём работу

Отметим важную роль смазывающего материала для проведения операции обработки поверхности комбинированными методами. При обработке отверстий методами дорнования и редуцирования неправильный выбор смазки может резко ухудшить качество обрабатываемой поверхности, привести к понижению стойкости инструмента и увеличению силы дорнования. Отсутствие смазки в процессе дорнования приводит к налипанию металла на поверхность дорна, что может вызвать его заклинивание.

При выборе смазочного материала необходимо исходить из условия получения наилучшей чистоты обработанной поверхности. Для этого смазочный материал хотя бы частично должен устранять непосредственный контакт между дорном и поверхностью отверстия обрабатываемой детали, т.е. поддерживать трущиеся поверхности на расстоянии друг от друга.

Как правило, при дорновании применяются жирные кислоты, соединения глицерина с пальмитиновой кислотой, эмульсия Укринол, эмульсия Аквол-2, масло МР-1 (для омедненных поверхностей). В данной работе рассмотрено воздействие композиции на основе масла И-40 с добавлением металлоплакирующей маслорастворимой присадки «Валена» (ТУ 0257-001-17368431-05) на качество трубной заготовки, обрабатываемой методом комбинированного дорнования и редуцирования по наружной и внутренней поверхностям.

Металлосодержащая маслорастворимая композиция представляет собой густую пасту темно-зеленого цвета, кинематическая вязкость при 100⁰С составляет 15 мм²/с. Правильно подобранный смазочный материал способен уменьшить параметр Ra обработанной поверхности и снизить коэффициент трения.

В работе проведена серия экспериментов по определению влияния процентного содержания присадки на качество поверхности и шероховатость. За начальную концентрацию принята 10 % доля присадки в общем объеме смазочной композиции,

вводимой в зону трения при дорновании. Так же проведены испытания с композицией в 15 %, 20 % и 30 % содержанием металлоплакирующей присадки «Валена».

Режимы деформирования разделяют на три категории: легкий, средний, тяжелый. Как показал эксперимент для снижения величины износа, применение комбинированных методов обработки металлов давлением, осуществляемых при различной концентрации металлоплакирующей присадки «Валена», возможно при всех трех режимах деформирования.

Для легкого и среднего режимов повышение концентрации металлоплакирующей присадки «Валена» по (ТУ 0257 001-17368431-05) влияет на уменьшение величины износа Ул:

- для легкого режима на 20 %,
- для среднего режима на 15 %,
- для тяжелых условий работы узлов трения, какими являются комбинированные методы обработки металлов давлением, с увеличением концентрации металлоплакирующей присадки «Валена» усилия существенно снижаются при 15 % концентрации присадки на 10 %, при 25 % концентрации присадки на 20 %, а при 30 % концентрации на 28 %.

Для легких режимов снижение величины износа обеспечивает снижение расхода масляной составляющей смазывающей композиции. Для среднего режима в связи с более интенсивным проявлением эффекта безызносности кроме снижения износа следует отметить, что в периоде до появления задиров увеличивается в 3-5 раз ресурс работы сопряжения. Таким образом, эксперимент подтверждает целесообразность применения металлоплакирующей присадки «Валена» при различных режимах нагружения трибосопряжений.

Процессы дорнования и редуцирования широко применяются в производстве. Они позволяют получить высокую точность, например, при изготовлении многофункциональных втулок, применяемых в сельскохозяйственных машинах. Качество внутренней и внешней поверхностей деталей такого типа целесообразно улучшать обработкой комбинированными методами совместного редуцирования и дорнования с применением металлоплакирующей присадки «Валена».

Литература

1. *А.Л. Воронцов.* Напряженное состояние заготовки при обратном выдавливании // Известия вузов. Машиностроение. 1980. № 10. С. 108-112.
2. *А.Л. Воронцов.* Деформированное состояние заготовки в условиях нестационарного пластического течения // Труды МВТУ № 335. Машины и технология ОМД. 1980. С. 102-113.
3. *А.Л. Воронцов.* Напряженное состояние заготовки при выдавливании пуансоном со сферическим торцом произвольного радиуса // Совершенствование процессов обработки металлов давлением: Межвузовский сборник научных трудов. - М.: ВЗМИ. 1987. С. 37-44.
4. *Д.Н. Гаркунов, В.Г. Бабель, С.М. Мамыкин, Э.Л. Мельников, В.С. Гаврилюк.* Новые направления в триботехнике и их использование в повышении износостойкости механизмов и машин. М.: Издательство МСХА, 2007. 58 с.
5. *Н.Н. Зубков, И.Г. Кременский, С.Г. Васильев.* Восстановление изношенных поверхностей с использованием металлорежущего оборудования. - М.: Машиностроение, 2001. – 415 с.
6. *Ю.Г. Проскураков, В.Н. Романов, А.Н. Исаев.* Объемное дорнование отверстий. М.: Машиностроение, 1984. - 223 с.

УДК 621.892.92

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОСТОЙКОСТИ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ

Лилия Андреевна Мельникова, Даниэль Валерьевич Умаров

*Студенты 3 курса,
кафедра «Технология обработки материалов»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: А.В. Бодарева,
преподаватель кафедры «Технология обработки материалов»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Трение - удивительный феномен природы. Оно подарило человеку тепло, огонь и многое другое. Его изучали многие ученые такие, как Леонардо да Винчи, Ломоносов, Кулон, Эйлер, Менделеев и многие другие. Сегодня в нашей стране этим феноменом занимаются такие профессора, как Грязнов Б.Т., Дроздов Ю.Н., Евдокимов Ю.А., Проников А.С., Сорокин Г.М., Чичинадзе А.В. и другие. До настоящего времени трение во многих его аспектах остается загадкой. И сегодня с этим связана одна из самых больших проблем современности - износ машин и механизмов. Расходы на восстановление огромны, причем ежегодно они увеличиваются. Развитие техники и, в частности, машиностроения, придало проблеме повышения долговечности машин огромную значимость с точки зрения экономики материальных ресурсов и рабочей силы и приобщило к этой проблеме широкий круг конструкторов, технологов, эксплуатационников, а так же ученых различных специальностей. По своей сути трение - это не только износ, но возможно и восстановление. Был открыт феномен «безизносного» трения - это фундаментальное открытие Дмитрия Николаевича Гаркунова доказало, что трение может не только разрушать, но восстанавливать и улучшать свойства поверхности деталей. При определенном соотношении смазочного материала и присадки возможно существенное улучшение ресурса пары трения.

Важное значение в узле трения имеет качество поверхности. До середины 90-х годов 20 века считались важными только: параметр твердости и шероховатости. Последние исследования показывают, что помимо выше перечисленных параметров более существенное влияние оказывают: условия трения и смазочный материал.

Целью данной работы является исследование свойств смазочных материалов, а так же определение износостойкости и термостойкости материала пары трибосопряжения.

В основе данной статьи лежит исследование термостойкости смазочных композиций на основе минерального масла, глицерина, а так же композиций с добавлением медного купороса и металлоплакирующей присадки на медной основе «Валена».

Испытания проводились на машине трения МТ-10 (рис. 1).

Проведение испытаний:

Образцы устанавливаются на испытательной машине, задаются режимы приработки и цикла испытаний. В зоне сопряжения образцов ведётся измерение температуры саморазогрева смазочного материала непрерывно с заданным интервалом. Регистрируются величины температуры саморазогрева- T_c ; и критической температуры- $t_{кр}$. По результатам испытаний оценивается пятно контакта параметрами - полуоси $a \times b$ площадь пятна контакта S_k , образующегося после проведения испытаний.

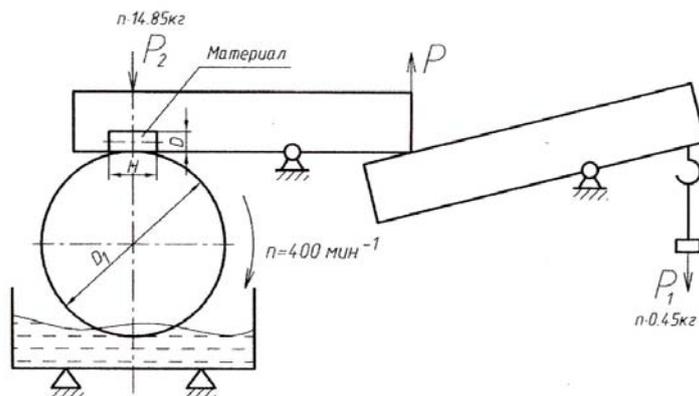


Рис.1. Машина трения МТ-10

Определяется линейный U_l , объёмный $U_{об}$ и весовой U_g износ испытываемого образца.

Технологический процесс сравнительных испытаний образцов на термостойкость и износостойкость.

Разработке технологического процесса предшествовали обширные испытания некоторых моторных масел (Лукойл-Стандарт; Кастрол) и машинного масла М14В на машине трения ИИ5018 по схеме «Колодка-ролик». Испытания проводились в лаборатории триботехники Московского государственного агроинженерного университета им. В.П. Горячкина.

Эти испытания предусматривали испытания на термостойкость в течении трёхчасовой работы машины трения ИИ 5018.

При работе на маслах без присадок дымление их (т.е. возникновение критической для данной смазки температуры $T_{кр}$), происходило через 20, 40, 60 минут. Трёхчасовые испытания выдерживали лишь смазочные материалы, в которые была добавлена маслорастворимая металлоплакирующая присадка «Валена». Она существенно увеличивала срок испытаний до 2...3 часов, причём дымление таких композиций (моторное масло Лукойл-Стандарт, машинное масло М14В) не наступало.

Исходя из испытаний, проведенных в МГАУ им. В.П. Горячкина и в МГТУ им. Н.Э. Баумана, минимальное время, при котором начиналось дымление некоторых композиций, составило 20 минут. Поэтому время испытания было выбрано равным 20 минутам, с добавлением времени приработки пары трения «ролик – роликоподшипник» и «колодка-ролик» в течении одной минуты.

Ускоренные испытания на термостойкость и износостойкость позволили выполнить обширную программу сравнительных испытаний масел, композиций из масел, противоизносных присадок и специализированных смазок, применяемые в автотранспорте, авиации, на железных дорогах России в количестве более 60 вариаций. Также они позволили разработать технологию испытаний смазочных материалов на термостойкость и износостойкость

Испытания проводят в следующей последовательности:

– наполняют съёмную ванну машины трения смазочным материалом или композицией смазочного материала с присадкой. Композицию тщательно перемешивают, включив вращение ролика на 30 секунд. Уровень наполнения ванны смазочным материалом – на 1...3 мм ниже оси симметрии ролика

– устанавливают образцы в систему рычагов и нагружают её двумя грузами.

– в течении одной минуты осуществляют приработку пары трения. Приработка, как правило, сопровождается сначала шумом и скрежетом, затем к концу приработки звук стихает, наступает установившийся режим трения.

– в течении последующих двадцати минут образцы нагружают четырьмя грузами, непрерывно или с интервалом в три минуты, регистрируют с помощью хромель-алюминиевой термопары.

-температуру саморазогрева смазочного материала в ванне на расстоянии 1...3 мм от зоны трения образцов с помощью устройства М-836 для контроля температуры или с помощью датчика температуры, подключённого к ПЭВМ с помощью согласующего устройства и соответствующего программного обеспечения.

– по истечении 20 минут машина трения останавливается, образцы, ролики и ванна промываются, обезжириваются, просушиваются для следующего испытания.

– поверхность ролика зачищается с помощью шлифовальной бумаги в течении 10...20 секунд при включённом шпинделе (400 об/мин). Шлифовальная бумага при этом накладывается на твёрдую подложку.

– образцы промываются, обезжириваются, просушиваются и отправляются на обработку результатов испытаний.

– все результаты испытаний заносятся в протокол.

По протоколам составляется таблица (табл. 1).

Табл. 1. Протокол испытаний

Композиция	T=0с	T=60с	T=180с	T=300с	T=360с	T=480с	T=540с	T=660с	Длина/ ширина пятна	Линейный износ
Минеральное масло + неорганический загуститель + медный купорос (10%)	23	32	45	56	60	64	66	69	3,67/2,2	6,338
Минеральное масло + неорганический загуститель + Валена (10%)	23	25	39	51	55	60	66	71	6,41/3,37	16,957
Глицерин + неорганический загуститель + медный купорос (10%)	23	32	59	78	84	90	104	116	4,34/2,44	8,312
Глицерин + неорганический загуститель + присадка Валена (10%)	23	28	70	84	86	91	87	90	4,27/2,08	6,972
Минеральное масло + неорганический загуститель(ограниченное количество) + медный купорос (10%)	23	28	50	56	58	62	64	66	4,13/2,33	7,553
Минеральное масло + неорганический загуститель(ограниченное количество) + Валена (10%)	23	30	42	52	55	60	62	65	8,16/3,97	25,43

Термостойкость- способность материалов сохранять неизменным строение и физические свойства при повышении температуры. В наших экспериментах измерение термостойкости масляных композиций не обходимо для исключения заклинивания трибосопряжений в паре трения.

Экспериментальным путем выяснилось, что смазочным материалом с наибольшей термостойкостью является образец №6 – Минеральное масло + неорганический загуститель(ограниченное количество) + Валена (10%).

Высокая термостойкость является следствием того, что в данном образце присутствует металлоплакирующая присадка «Валена»-10%

Смазочным материалом с наименьшей термостойкостью является образец №3- Глицерин + неорганический загуститель + медный купорос (10%)

Причиной низкой термостойкости в данном смазочном материале является наличие меди не как сервовитной пленки, а в кристаллической форме.

Износостойкость – свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания.

Смазочный материал №1 является наиболее износостойким за счет неограниченного количества неорганического загустителя (Минеральное масло + неорганический загуститель + медный купорос (10%)).

Наименее износостойким оказался образец №6 - Минеральное масло + неорганический загуститель (ограниченное количество) + Валена (10%), в виду того, что количество неорганического загустителя ограничено и процентное содержание валены слишком большое.

По результатам эксперимента видно, что смазочный материал №1 имеет большую термостойкость и износостойкость по сравнению с образцом №6 и №3 за счет неограниченного количества неорганического загустителя, а так же имеет высокую износостойкость по сравнению с образцом №6 так, как неорганический загуститель влияет негативно на металлоплакирующую присадку «Валена», она предназначена для растворения в минеральном масле и основа из минерального масла и загустителя является не подходящей для компонентов металлорастворимой присадки на основе меди - «Валена».

Пятно контакта и значение линейного износа 25.43 по сравнению с пятном контакта 6.33 при композиции из минерального масла и медного купороса в 3.5 раза больше, так как компоненты медного купороса лучше взаимодействуют с неорганическим загустителем и минеральным маслом.

Такие свойства материалов влияют на режимы работы узла трения

Выводы:

1. Наибольшей термостойкостью обладает смазочный материал №6 - Минеральное масло + неорганический загуститель(ограниченное количество) + Валена (10%).

2. Наименьшей термостойкостью обладает смазочный материал № 3 - Глицерин + неорганический загуститель + медный купорос (10%)

3. Наибольшей износостойкостью обладаем смазочный материал №1 - Минеральное масло + неорганический загуститель + медный купорос (10%)

4. Наименьшей износостойкостью обладает смазочный материал №6 - Минеральное масло + неорганический загуститель (ограниченное количество) + Валена (10%).

5. Лучшей основой для присадки «валена» является минеральное масло без добавлений

6. Лучшей основой для куприда является неорганический загуститель с добавлением минерального масла.

7. Металлоплакирующая присадка «Валена» не совместима с неорганическим загустителем в то время, как медный купорос уменьшает площадь пятна контакта в 3.5 раза.

Литература.

1. Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л., Гаврилюк В.С. Триботехника, краткий курс, - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 365с.

2. Гаркунов Д.Н. Эффект безызносности при трении, водородное изнашивание металла, - М.: МСХА, 2007. - 383 с.

3. Трение и изнашивание при высоких температурах, - М.: Наука, 1993. - 154 с.

4. Способы снижения интенсивности изнашивания алюминиевых сплавов при прокатке. Ремонт восстановление модернизация, №12. -2011.-87 с.

УДК 621.2.082.18

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОСТОЙКОСТИ ПРОТИВОИЗНОСНЫХ ПРИСАДОК НА ОСНОВЕ БАЗОВОГО МАСЛА С ДОБАВЛЕНИЕМ НАНОЧАСТИЦ

Зульфия Сулпановна Рахмангулова, Ирина Александровна Сентяева

*Студентки 3 курса,
кафедра «Технологии обработки материалов»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: А.В. Бодарева,
преподаватель кафедры «Технологии обработки материалов»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

Развитие техники и, в частности, машиностроения, придает проблеме уменьшения изнашивания узлов деталей машин огромную значимость с точки зрения экономии материальных ресурсов. Ряд конструкторов, технологов, эксплуатационников принимает участие в решении проблем уменьшения износа пар трения. Ввиду большого количества противоизносных композиций, потребитель зачастую не знает, каким именно композициям отдать предпочтение.

Данная работа направлена на экспериментальное исследование термостойкости. В работе сделана попытка дать сравнительную оценку противоизносных присадок на основе наночастиц. Основным критерием сравнения противоизносных композиций является термостойкость, так как тепловые явления и напряжения влияют на трение и износ. Также изнашиванию узлов трения способствуют процессы образования водорода и его внедрения в зону контакта. Для безаварийной работы узла трения необходимо обеспечить высокое качество поверхностей в трибосопряжениях.

С целью определения эффективности присадки при использовании в моторном масле, необходимо установить влияние ее концентрации на интенсивность изнашивания, коэффициент трения и температуру трибосопряжений как основных триботехнических характеристик. Основной задачей данной работы является выбор

наиболее оптимальной противоизносной композиции на основе наночастиц по критерию термостойкости и износостойкости смазочных материалов для узлов ДВС.

Смазывание поверхностей трения деталей машин необходимо для уменьшения сил трения, интенсивности изнашивания и нагрева деталей, а также для защиты поверхностей от коррозии во время простоя машины. Кроме того, смазочный материал оказывает демпфирующее и охлаждающее действие. Поток смазочного материала отводится как теплота, возникающая при трении, так и теплота от нагретых деталей машины. Также потоком масла из зоны трения выносятся продукты изнашивания. Для улучшения эксплуатационных свойств минеральных масел применяют специальные добавки к ним, называемые присадками. Присадки к маслам должны быть хорошо растворимыми и не выпадать в виде осадка, а также не задерживаться в фильтрах смазочной системы и не оседать на поверхностях трения.

В связи с ужесточением условий эксплуатации машин и механизмов, большими тепловыми и фрикционными нагрузками, традиционно применяемые органические присадки не могут удовлетворить требования, предъявляемые к смазочным материалам. Для решения этой проблемы необходимо развивать принципиально новое направление в разработке смазочных материалов, основанное на научном открытии эффекта безызносности в узлах трения «металлоплакирующих» смазочных материалов. При трении в режиме безызносности материал одной детали отделен от материала сопряженной детали металлическим (медным) слоем - сервоитной пленкой. Формирование этой пленки в результате самоорганизации наночастиц на стальных поверхностях контактирующих деталей машин в процессе трения происходит из ионов меди, которые, подходя к ювенильной поверхности трения, захватывают электроны от стальной поверхности и превращаются в атомы, которые активно образуют кристаллическую решетку меди толщиной 1...2 мкм.

Для сравнения составляем несколько композиций, для составления которых используем:

1. В качестве рабочего материала - масло ТНК Magnum 15W-40.

ТНК Magnum Mineral изготавливается на основе гидроочищенных минеральных базовых масел с использованием патентованных импортных технологий и компонентов.



Рис.1. Масло ТНК-Magnum 15W-40

2. Фиксатор состояния сопряжений ДВС «Сурм-Фиксатор» (производство-фирма «Ревитал»).

«СУРМ-ФС» применяется в двигателях внутреннего сгорания грузовых и легковых автомобилей, локомотивов, речного и морского флота, тракторов, в

металлообрабатывающей промышленности (протяжка, штамповка, обработка резанием, хонингование и др.); горнорудном оборудовании, машиностроении и др.



Рис. 2. «СУРМ-Фиксатор»

Принцип действия данной присадки заключается в том, что композит, используя энергию трения в сопряжениях, образует в зонах максимальных нагрузок восстанавливающие, антифрикционные, высокопрочные, армированные покрытия.

3. Металлоплакирующая смазочная композиция - присадка «Валена»

«Валена» - маслорастворимая многофункциональная металлоплакирующая присадка применяется в узлах трения горнодобывающего и перерабатывающего оборудования, а также в тяжело нагруженных узлах трения в машиностроении. Этот металлоплакирующий СМ позволяет повысить долговечность узлов трения, снизить потери на трение и тем самым повысить КПД машин и оборудования, уменьшить расход смазочных материалов и увеличить период между смазочными работами.

Табл. 1. Состав исследуемых композиций

№ п/п	Композиция	Базовое масло		Присадки	
		ТНК Magnum 15W-40	50 мл	отсутствуют	
1.	Масло ТНК Magnum SAE 10W-40	ТНК Magnum 15W-40	50 мл	отсутствуют	
2.	Масло ТНК Magnum 15W-40+ Сурм- Фиксатор 2,5%	ТНК Magnum 15W-40	50 мл	Сурм-Фиксатор	1,25 мл
3.	Масло ТНК Magnum 15W-40+ Сурм- Фиксатор 2,5%+ «Валена» 0,5%	ТНК Magnum 15W-40	50 мл	Сурм-Фиксатор «Валена»	1,25 мл 0,25 мл
4.	Масло ТНК Magnum 15W-40+ Сурм- Фиксатор 2,5%+ «Валена» 1,25%	ТНК Magnum 15W-40	50 мл	Сурм-Фиксатор «Валена»	1,25 мл 0,625 мл
5.	Масло ТНК Magnum 15W-40+ Сурм- Фиксатор 2,5%+ «Валена» 2,5%	ТНК Magnum 15W-40	50 мл	Сурм-Фиксатор «Валена»	1,25 мл 1,25 мл

В ходе экспериментов оценивалось масло ТНК Magnum 15W-40 в сочетании с определенным количеством наноприсадки «СУРМ-Фиксатор» и изменяющимся параметром концентрации металлоплакирующей присадки «Валена». Испытания проводились с целью определить наиболее подходящую концентрацию добавок для рассматриваемого узла ДВС, а также их свойства и влияние на трибосопряжение.

Лабораторные триботехнические испытания композиций проводились на машине трения МТ-10, при работе на которой моделировались условия, близкие к условиям катастрофического износа рассматриваемого узла ДВС.

Табл. 2. Параметры работы машины трения

Параметр	Значение
Время приработки, мин	1
Нагрузка при приработке, Н	279
Время испытаний под рабочей нагрузкой, мин	20
Рабочая нагрузка, Н	594
Температура окружающей среды, °С	23
Частота вращения ролика, об/мин	500

Принцип действия машины трения: электродвигатель передает крутящий момент на ременную передачу. К центру большего шкива присоединен вал, на котором расположен ролик. Машина трения нагружается через рычаг грузом, что позволяет обеспечить начальный контакт образца, надежно закрепленного в держателе, с роликом.

Машина трения устанавливается в рабочее положение, грузы закреплены на подвесе через систему рычагов, с тем, чтобы первоначальный контакт был оптимальным.

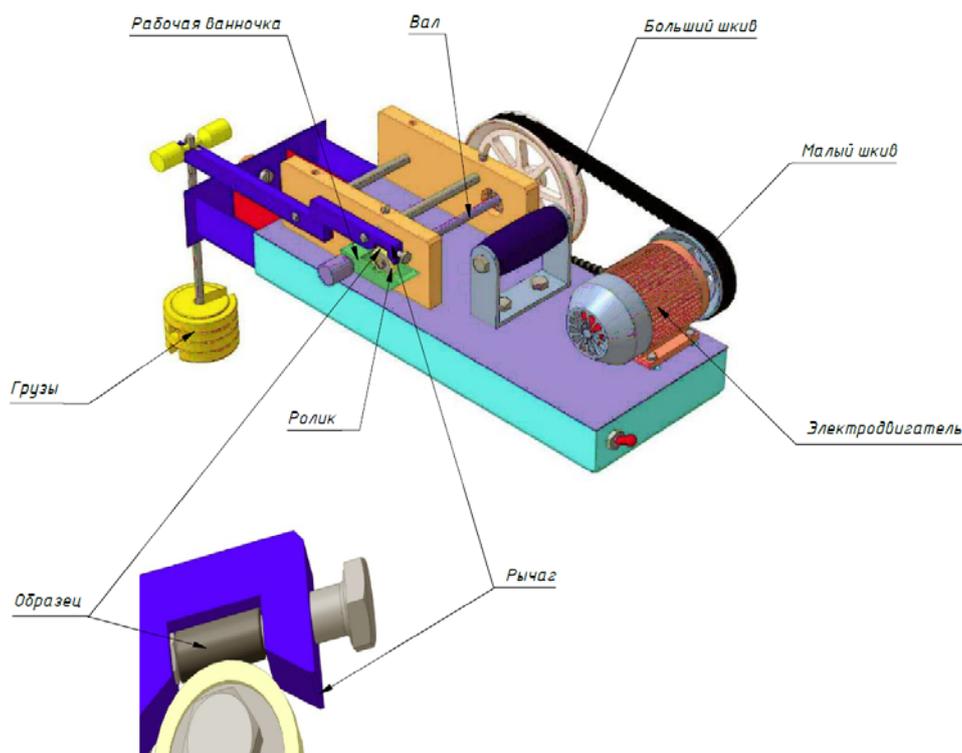


Рис. 3. Схема машины трения

При приработке (1 минута) система работает с 2 грузами, после чего количество грузов увеличивается до 4. Вес каждого груза - 148,5 Н.

Измерения температуры проводятся последовательно: после приработки, а затем каждые 2 минуты. Измерения производятся с помощью термопары (хромель-копель),

установленной таким образом, чтобы один конец проводника находился все время эксперимента в композиции под роликом, но не касался бы его.

В качестве образцов пары трения были выбраны: ролик из стали У8А (HRC 58...62), роликоподшипники 8x20DIV по ГОСТ 22696-77 из стали ШХ15.

Суть эксперимента заключается в оценке пятна контакта материала при контакте с роликом машины трения. Для этого используется следующая формула

$$S_{нк} = \pi \cdot \frac{A}{2} \cdot \frac{B}{2},$$

где $S_{нк}$ -площадь пятна контакта, А и В - большая и малая полуоси пятна контакта

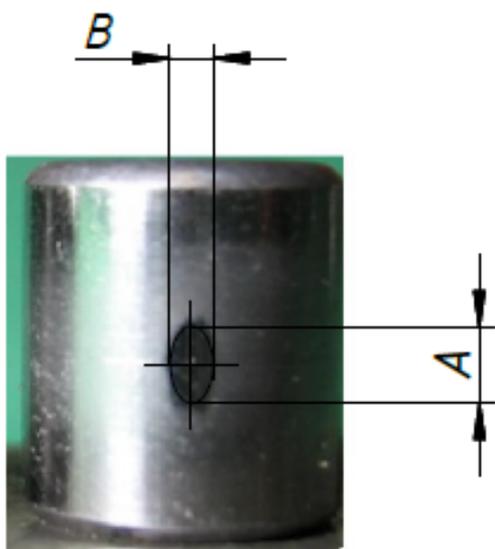


Рис. 4. Пятно контакта

Образовавшаяся в ходе опытов нанопленка способствует предохранению поверхностного слоя металла от катастрофического разрушения, уменьшает размеры износа.

Результаты экспериментов сведем в табл. 3.

В процессе проведения экспериментов с помощью термопары замерялась температура в цикле исследования каждой композиции (в среднем - 21 минута). Измерения проводились каждые две минуты с тем, чтобы проследить динамику изменения температуры и характер износа в результате нагрева.

Полученные сведения по температуре (рис. 5) позволяют сделать вывод о температурной стойкости каждой композиции, что особенно важно, поскольку этот параметр влияет не только на износостойкость, но и на ресурс работы узла трения.

По результатам экспериментов можно сделать вывод о том, что составные частицы металлоплакирующей присадки «Валена» совместно с наночастицами присадки «СУРМ-Фиксатор» дали худший результат по сравнению с использованием только нанокomпозиции. Тем самым можно заключить, что совместное использование 2 мер защиты от износа нерационально, так как имеет место перекрытие свойств.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучения совместимости наночастиц с элементами меди, содержащимися в присадке «Валена».

Табл. 3. Результаты экспериментов

Материал	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀	T ₁₁	A\B,мм	S _{пк} ,мм ²
Масло ТНК Magnum 15W-40	23	45	66	80	87	92	96	99	101	104	104	106	A=5 B=2,5	9,8125
Масло ТНК Magnum 15W-40+ Сурм- Фиксатор 2,5%	23	34	55	65	70	76	81	85	87	90	93	97	A=2,13 B=1,1	1,839255
Масло ТНК Magnum 15W-40+ Сурм- Фиксатор 2,5%+ «Валена» 0,5%	23	27	44	47	62	65	68	70	72	74	76	77	A=2,53 B=1,7	3,376285
Масло ТНК Magnum 15W-40+ Сурм- Фиксатор 2,5%+ «Валена» 1,25%	23	51	75	89	97	101	104	106	109	111	111	111	A=6,76 B=3,27	17,35252
Масло ТНК Magnum 15W-40+ Сурм- Фиксатор 2,5%+ «Валена» 2,5%	23	68	87	96	106	110	112	113	114	114	115	115	A=6,48 B=3,1	15,76908

T₀-начальная температура

T₁-температура после приработки (1 минута)

T₂...T₁₁-температура, измеряемая каждые 2 минуты (с 3 по 21 минуту)

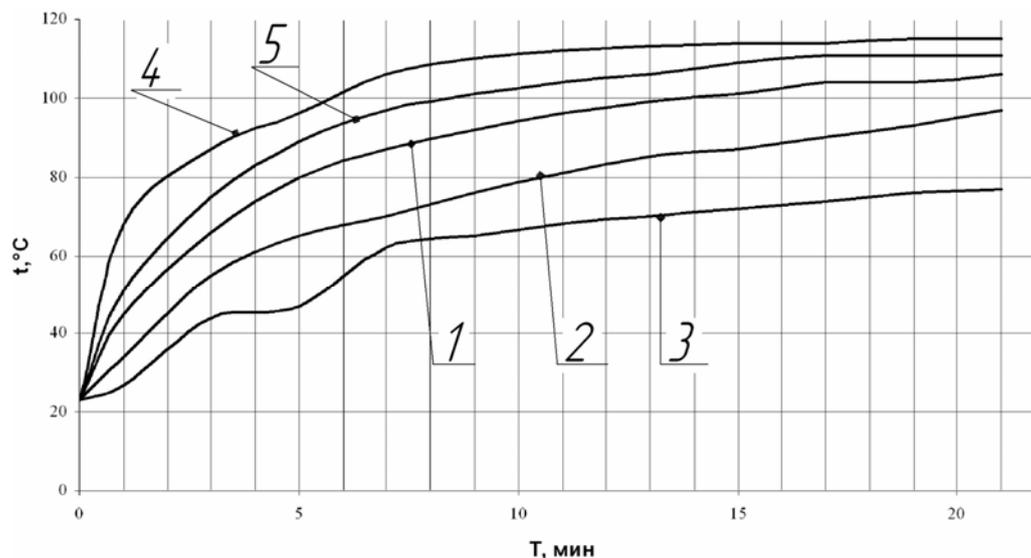


Рис. 5. Зависимость рабочих температур от времени

Рекомендации

1. Не следует использовать одновременно присадки «Валена» и нано-затирки типа СУРМ;
2. Повышение концентрации нано-затирки нецелесообразно с точки зрения экономической эффективности и эксплуатационных характеристик.

Выводы

1. Наибольшая термостойкость определена для композиции базового масла ТНК Magnum SAE 15W-40 с добавлением СУРМ-Фиксатора (2,5%) и маслорастворимой металлосодержащей присадки на медной основе «Валена» (0,5%);
2. Максимальная износостойкость пары трения «поршень-цилиндр» достигается с введением в базовое масло 2,5% СУРМ-Фиксатора без присадки;
3. Выявлена оптимальная концентрация нано-присадки, она составляет 2,5%;
4. При концентрации металлосодержащей маслорастворимой присадки на медной основе «Валена», превышающей 0,5%, не обнаружено эффекта снижения интенсивности изнашивания контактирующих поверхностей.
5. Для пары трения поршень-цилиндр наиболее оптимальной является композиция №2 (Масло ТНК Magnum 15W-40+ Сурм - Фиксатор 2,5%).

Литература

1. Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л., Гаврилюк В.С.- Триботехника. Краткий курс. -М.:,2008.-308 с., ил.143.
2. Потапов Г.К., Балабанов В.И., Быстров В.Н., Антонов В.Н.- Обоснование концентрации металлоорганических присадок к моторным маслам. Международный научно-технический журнал. Эффект безызносности и триботехнологии.:1997.-87 с.

Содержание

	стр.
Секция №1. Metallорежущие станки и оборудование	5
<i>В.С. Дудкин, И.П. Иванов, М.И. Коньшков.</i> Повышение технологических свойств корпусных деталей металлорежущих станков на этапе изготовления ..	6
<i>Е.М. Загороднюк, И.П. Иванов.</i> Перспективные методы борьбы с тепловыми деформациями металлорежущих станков	9
<i>А.С. Клецов.</i> Методика экспериментальной оценки параметрической надежности станков фрезерной группы	12
<i>Л.В. Кабакова.</i> Тензорезисторные преобразователи «кнс» и их применение в станкостроении	17
<i>С.В. Лаврова, К.А. Герасимов.</i> Разработка теории тепловых смещений, позволяющей системно анализировать влияние факторов на точность обработки на станке	22
<i>М.Ю. Чупов.</i> Обеспечение качества сборочных единиц космической техники на основе адаптивных систем	29
<i>И.В. Шемякин.</i> Нарезание ходовых винтов на токарно-винторезных станках с использованием прогрессивных инструментальных материалов	34
<i>А.Г. Шишов.</i> Автоматизация исследований силовых смещений упруго-фрикционной системы	40
Секция №2. Инструментальная техника и технологии.....	59
<i>В.А. Косырев.</i> Исследование процесса колебаний при резьбофрезеровании	60
Секция №3. Технологии машиностроения	75
<i>Э.С. Бирюков.</i> Измерение параметров торможения в гиперзвуковых потоках ..	76
<i>М.С. Ёлкин.</i> Назначение режимов резания при чистовой обработке дисков ГТД с учетом покрытий режущего инструмента	82
<i>Э.В. Харитонов.</i> Формирование технологически ориентированных структур в пространстве механосборочного комплекса	88

	стр.
Секция №4. Метрология и взаимозаменяемость	105
<i>Р.С. Нахушев.</i> Микроконтроллерная обработка результатов измерения радиального биения цилиндрической детали	106
<i>А.Б. Сырицкий.</i> Исследование поверхностного дефекта напыления хрома на стекле с помощью сканирующей туннельной микроскопии	109
Секция №5. Литейные технологии	117
<i>Д.А. Бондарчук.</i> Долговечность песчано-глинистых формовочных смесей	118
<i>Д.Д. Коека.</i> Исследование влияния размеров элементов литниково-питающей системы на качество отливок в блоке	122
<i>Т.И. Сивурова.</i> Проблемы разработки математических моделей в литье под низким давлением	129
<i>Ю.О. Фокин, Л.В. Пастухов.</i> Создание высоких скоростей охлаждения аморфных микроотливок	142
<i>К.К. Халикова.</i> Дефекты моделей при ЛВМ и способы их устранения	150
Секция №6. Оборудование и технологии обработки давлением	159
<i>А.И. Алимов.</i> Моделирование технологических процессов получения титановых колец	160
<i>Г.Д. Григоренко.</i> Автоматические двухклетьевые ковочные вальцы	170
<i>Е.К. Дунда.</i> Исследование процесса резки трубы плоским ножом	176
<i>А.М. Дюжев.</i> Выбор параметров зубчатой передачи механических прессов на основе анализа распределения контактных напряжений	180
<i>А.Ю. Зимин.</i> Горячее объемное двухстороннее выдавливание поковки типа крестовина	190
<i>И.М. Койдан.</i> Стратегии и цели системы адаптивного программного управления технологическим процессом штамповки металла в твёрдожидком состоянии	196
<i>Н.Н. Лабанова.</i> Конструкция штампа с разъемными матрицами для штамповки детали «обойма» на кривошипном горячештамповочном прессе	202
<i>В.В. Марковцева.</i> Задача уменьшения величины радиуса зон сгиба гнутых профилей из листов авиационного сплава В95пчАМ	207
<i>И.Ю. Марухин, Е.А. Гурьянова.</i> Гидравлический трубогибочный пресс-автомат с устройствами автоматической подачи и резьбонарезания труб	213

	стр.
<i>М.Ю. Маштакова.</i> Сопоставление технологических показателей изготовления П-образных кронштейнов прессованием и выдавливанием	218
<i>Т.В. Милевская.</i> Усовершенствование конструкции бабы молота	226
<i>А.В. Поликарпов.</i> Проектирование техпроцесса штамповки боковины Рено Логан с помощью ПК Autoform	231
<i>Е.О. Яковлева.</i> Повышение предельного формоизменения за счет совмещения операций обжима, раздачи и вытяжки	238
Секция №8. Материаловедение в машиностроении	249
<i>А.Э. Гордей.</i> Технология химико-термической обработки: карбонитрация. Структура и эксплуатационные свойства карбонитридных слоев стали 25X2M1Ф	250
<i>Н.А. Якушева.</i> Исследования возможности снижения температуры закалки мартенситостареющей стали типа ВКС-180 с целью увеличения энергоэффективности	257
Секция №9. Промышленный дизайн	267
<i>Я.А. Барменкова.</i> Дизайн автономного мобильного робота для соревнований «Евробот»	268
<i>А.И. Кленин.</i> Система эффективного управления образовательными услугами в области промышленного дизайна	270
<i>Е.И. Королева.</i> 3D визуализация промышленных роботов	275
<i>И.В. Селиванов.</i> Возможности дизайна в организации функционального пространства мобильной системы пожаротушения	281
<i>Д.Д. Спасская.</i> Эргодизайн рабочего места руководителя	285
<i>А.А. Яшин.</i> Установка для сверхзвукового газопламенного напыления покрытий JetSpray	290
Секция №10. Оборудование и технологии прокатки	293
<i>И.И. Лубнин.</i> Литейно-прокатный агрегат для производства широкополосной стали	294
<i>Д.А. Матурин, А.И. Хоменко.</i> Исследование влияния внеконтактных зон в процессах обработки металлов давлением	304

	стр.
<i>А.А. Солякова.</i> Новая технология производства железнодорожных рельсов	309
<i>А.А. Солякова.</i> Новые металлургические заводы в центре РФ	318
Секция №11. Электронные технологии в машиностроении	327
<i>И.Ю. Балашов.</i> Исследование новых технологических операций при изготовлении прецизионных печатных плат. Заполненные переходные отверстия	328
<i>Р.О. Емельяненко.</i> Вакуумная автоматическая линия для обогащения наноструктур широкого применения изотопами водорода	348
<i>Е.В. Одинокова.</i> Требования к материалам в МОП-транзисторах с нанометровыми размерами элементов	351
<i>А.С. Селиваненко.</i> Система активной виброизоляции на основе магнитоэологических эластомерных демпферов для нанотехнологического оборудования	357
<i>Е.Н. Тушенцова.</i> Исследование антидиффузионных покрытий, получаемых магнетронным и электродуговым методом с сепарацией потока плазмы	363
<i>А.С. Ухичев.</i> Разработка структуры вакуумной линии получения наноструктурированного топлива	371
Секция №12. Лазерные технологии в машиностроении	375
<i>Л.Н. Баландина, К.Л. Попов.</i> Исследование очистки окислов с медной поверхности методом лазерной абляции	376
<i>А.В. Пересторонин.</i> Анализ методов определения остаточных напряжений в сварных конструкциях	381
<i>Хтет Аунг Лин.</i> Оценка области использования лазерной обработки совмещенными тепловыми источниками	387
<i>А.Е. Шупенев, Ю.М. Миронов.</i> Анализ поверхности тонких термоэлектрических пленок теллурида висмута полученных импульсным лазерным осаждением	391
Секция №13. Реновационные технологии	399
<i>А.В. Бодарева.</i> Повышение эффективности и качества комбинированных методов дорнования и редуцирования	400
<i>Л.А. Мельникова, Д.В. Умаров.</i> Исследование термостойкости смазочных материалов на основе меди	406

	стр.
<i>З. С. Рахмангулова, И.А. Сентяева.</i> Исследование термостойкости противоизносных присадок на основе базового масла с добавлением наночастиц	410

СБОРНИК СТАТЕЙ ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ СТУДЕНТОВ
СТУДЕНЧЕСКАЯ НАУЧНАЯ ВЕСНА 2012:
«МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

4 – 7 апреля 2012г.
г. Москва
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Все материалы сборника публикуются в авторской редакции.
Ответственность за содержание материалов принадлежит авторам

Ответственный за выпуск: О.А. Белокуров
Компьютерная верстка: О.В. Зудина

Тираж Заказ
Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005 г. Москва, 2-я Бауманская, д. 5, <http://www.bmstu.ru>

© Сборник тезисов Всероссийской научно-технической конференции
Студенческая весна 2012: «Машиностроительные технологии»
- М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.

