

**УДК 620.179.16****ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ НА  
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ  
СПЕКТРАЛЬНЫМ МЕТОДОМ**

Сысоев Алексей Андреевич<sup>(1)</sup>, Ушаков Валентин Михайлович<sup>(2)</sup>, Данилов Вадим Николаевич<sup>(3)</sup>

*Аспирант<sup>(1)</sup>, доктор технических наук<sup>(2)</sup>, доктор технических наук<sup>(3)</sup>  
кафедра «Сварка, диагностика и специальная робототехника»*

*Московский государственный технический университет, АО НПО ЦНИИТМАШ*

*Научный руководитель: Л.Ю. Могильнер,  
доктор технических наук, профессор кафедры «Сварка, диагностика и специальная  
робототехника»*

В настоящее время в атомной и тепловой энергетике особенно актуальна проблема ухудшения механических свойств металла трубопроводов после длительного термического воздействия. В работе [1] Комиссия по ядерному регулированию США ставит под сомнение возможность продления эксплуатации оборудования АЭС с 60 до 80 лет. Причиной такого решения названа неопределённость, связанная со случайным характером режима деградации материала. Авторами настоящего доклада было предложено исследовать это явление при помощи ультразвукового спектрального метода контроля [2].

Исследуемые образцы были изготовлены из трубопроводов, находившихся в эксплуатации на тепловых электростанциях. Нарботка металла составила 0, 200.000 и 300.000 часов, что соответствует срокам эксплуатации, ориентировочно, 23 и 34 года. Характеристики исследуемых образцов приведены в таблице 1. По результатам металлографического анализа установлено, что при длительном температурном воздействии балл зерна увеличился с 8 до 6, а структура стала более дисперсной. На границах зёрен состаренных образцов появились выделения цементита.

Таблица 1. Параметры металла образцов

Номер образцов	Марка стали	Габаритные размеры, мм	Наработка, час	Температура эксплуатации, °С	Оборудование
Б01, Б02, Б03, Б04	12Х1МФ	20x20x20	0	-	Испытательный образец
1, 2, 3, 4, 5, 6, 11, 12, 13, 14, 15, 16	12Х1МФ	20x20x20	205192	545	Паропровод острого пара
Б5-1, Б5-2, Б5-3, Б5-4, Б5-5	12Х1МФ	20x20x20	300000	540	Главный трубопровод
В2-1, В2-2, В2-3, В2-4	15Х1М1Ф	20x20x20	0	-	Испытательный образец
В4-1, В4-2	15Х1М1Ф	20x20x20	208033	545	Паропровод горячего пароперегрева

Исследование АЧХ (амплитудно-частотной характеристики) сигналов проводилось с использованием дефектоскопа Multiscan в комплекте с преобразователями с номинальной частотой 10 МГц полосой пропускания от 7,5 до 14 МГц и номинальной частотой 15 МГц полосой пропускания от 14 до 19 МГц.

Таблица 2. Параметры АЧХ 1-го и 3-го донного эхо-импульса в образцах металла, номинальная частота преобразователя 10 МГц

Марка стали	Обозначение образцов	Наработка металла, тыс.ч.	Номер донного сигнала	Максимум спектра принятого АЧХ, f max, МГц
12Х1МФ	В0-1	0	1	9,2±0,23
	15	205,192	1	8,5±0,21
	В5-4	300,0	1	7,6±0,19
15Х1М1Ф	В2-3	0	1	8,7±0,22
	В4-2	208,033	1	8,4±0,21
12Х1МФ	В0-1	0	3	8,1±0,2
	15	205,192	3	7,1±0,18
	В5-4	300,0	3	6,3±0,16
15Х1М1Ф	В2-3	0	3	7,4±0,19
	В4-2	208,033	3	7,3±0,18

Таблица 3. Параметры АЧХ 1-го и 3-го донного эхо-импульса в образцах металла, номинальная частота преобразователя 15 МГц

Марка стали	Обозначение образцов	Наработка металла, тыс.ч.	Номер донного сигнала	Максимум спектра принятого АЧХ, f max, МГц
12Х1МФ	В0-1	0	1	15,4±0,39
	15	205,192	1	15,3±0,38
	В5-4	300,0	1	10,3±0,26
15Х1М1Ф	В2-3	0	1	15,4±0,39
	В4-2	208,033	1	15,5±0,39
12Х1МФ	В0-1	0	3	11,7±0,29
	15	205,192	3	5,9±0,15
	В5-4	300,0	3	2,3±0,06
15Х1М1Ф	В2-3	0	3	15,3±0,38
	В4-2	208,033	3	9,8±0,24

В эксперименте была измерена центральная частота 1 и 3 донных сигналов. Из таблиц 2 и 3 видно, что при увеличении наработки металла максимум спектра смещается в зону низких частот. Это объясняется увеличением балла зерна, увеличением количества рассеивателей в виде выделений цементита, а также увеличением дисперсии распределения зёрен по размерам. Как следствие, повышенное затухание оказывает большее влияние на высокочастотную часть спектра. За счёт этого амплитуда высокочастотных составляющих эхо-сигналов уменьшается быстрее, чем низкочастотных.

Таким образом, была установлена зависимость изменения центральной частоты спектра от изменения структуры металла. В результате экспериментов также установлено, что для анализа старения образцов целесообразно ориентироваться на измерения параметров 3-го донного сигнала, поскольку в ходе наработки образцов его параметры изменяются существенно, чем параметры 1-го донного.

### Литература

1. U.S.NRC. Expanded Materials Degradation Assessment. 2014 (volume 1-5).
2. Ушаков В.М., Данилов В.Н., Сысоев А. Исследование структуры металла при неразрушающих испытаниях ультразвуковым спектральным методом // Тяжелое машиностроение. 2022. №9. С. 2-8.