



Институт физики металлов имени М. Н. Михеева
Уральского отделения Российской академии наук



УрО РАН



ИМАШ УрО РАН

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

XXXII Уральской конференции с

международным участием

ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

(ЯНУСОВСКИЕ ЧТЕНИЯ)

24 ноября 2020 г., 30-31 марта 2021 г.

Екатеринбург

2020-2021

Физические методы неразрушающего контроля

(Янусовские чтения)

Тезисы докладов XXXII Уральской конференции с международным участием

г. Екатеринбург, 2020-2021

СОПРЕДСЕДАТЕЛИ ОРГКОМИТЕТА

Горкунов Э.С., академик РАН, ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург

Сморodinский Я.Г., профессор, д.т.н., ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург

Крёнинг Х.-М.В., проф., Саарский университет, Саарбрюкен, Германия, проф., университета Сан-Пауло, Бразилия

Сташков А.Н. (ученый секретарь конференции), к.т.н., ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург

ЧЛЕНЫ ОРГКОМИТЕТА

Вайнштейн И.А., д.ф.-м.н., УрФУ им. Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Василенко О.Н., к.т.н., ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург

Костин В.Н., д.т.н., ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург

Михайлов А.В., к.т.н., ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург

Поволоцкая А.М. к.т.н., ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург

Путилова Е.А. к.т.н., ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург

Ринкевич А.Б., член-корр. РАН, ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург

Смирнов С.В. д.т.н., ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург

Сясько В.А. президент РОНКТД, профессор, д.т.н., Санкт-Петербургский горный университет, г. С.-Петербург

Место проведения конференции:

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,
г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18.

СОДЕРЖАНИЕ

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ КОНТРОЛЯ ТРЕХСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ВСТРОЕННЫМИ ВОЛОКОННЫМИ ДАТЧИКАМИ БРЭГГА М.Ю. Федотов	7
ИЗМЕРЕНИЕ АНИЗОТРОПИИ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ УГЛЕГРАФИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ П.В. Соломенчук	9
ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСКОНТАКТНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СТИМУЛЯЦИИ И ЛАЗЕРНОГО ВИБРОСКАНИРОВАНИЯ В.Ю. Шпильной	11
ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ СВЧ- МУЛЬТИПАКТОРНОГО РАЗРЯДА Г.Н. Ахобадзе	13
РАЗРАБОТКА ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГЛУБИНЫ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ТОРЦЕВЫХ СВАРНЫХ ШВОВ СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН П.В. Соломенчук	15
РЕЗУЛЬТАТЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК И ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ А.С. Костюхин	17
ПРЕДИКТИВНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ПОИСКЕ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ УЧАСТКОВ ЗАРОЖДЕНИЯ ДЕФЕКТОВ КРН А.Н. Кузьмин	18
О ВЗАИМОСВЯЗИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ М.Р. Тютин	20
ОЦЕНКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ БЕТОННЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ВНЕШНЕМ ДЕТЕРМИНИРОВАННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ Е.К. Помишин	22
К ВОПРОСУ ОБ ИЗУЧЕНИИ ВЛИЯНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО НАГРУЖЕНИЯ НА МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ А.Н. Мушников	24
МАГНИТНО-СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ 3D СТАЛИ 09Г2С Ничипурук А.П.	26
ОПЫТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОЙ ТВЧ- ЗАКАЛКИ ОТВЕТСТВЕННЫХ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ ВИНТОВ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ Сандомирский С.Г.	28
УСТОЙЧИВОЕ К ОШИБКАМ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФЕКТА ФЕРРОМАГНЕТИКА Никитин А.В.	30

РАЗРАБОТКА СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ИЗДЕЛИЙ И ОБЪЕКТОВ Матвеева И.Н.	32
ПРИМЕНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕНИЙ В РЕЛЬСАХ ТЕКУЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ АНАЛИЗА ИХ ВЛИЯНИЯ НА НАРАБОТКУ РЕЛЬСА Тапков К.А.	34
О ПЕРСПЕКТИВАХ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ УПРУГОЙ И ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ Трибушевская Л.А.	36
МЕТОД АКУСТИЧЕСКОЙ ТЕНЗОМЕТРИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГОЛОВНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ Алифанова И.Е.	38
ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ КОМПТОНОВСКОГО ГАММА-ИНТРОСКОПА Купчинская Е.А.	40
ПРЕИМУЩЕСТВА НОВОГО ИНДИКАТОРА ДЕФЕКТОВ МЕТАЛЛА Суторихин В.А.	42
ДИАГНОСТИКА ТРУБОПРОВОДОВ ИНДЕНТИРОВАНИЕМ Казанкин В.А.	44
ПРИМЕНЕНИЕ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСЛОВИЙ МАКСИМАЛЬНОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СМЕННЫХ РЕЖУЩИХ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПЛАСТИН ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ Воронин В.В.	46
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ПРОЕКЦИОННОГО МУАРОВОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТА Лаптева У.В.	48
ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРА ЧАСТОТ МИКРО- И НАНО РЕЗОНАТОРА ОТ ДАВЛЕНИЯ Хакимов А.Г.	50
АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ГИДРОИСПЫТАНИИ СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ Кутень М.М.	52
АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ Егоров Р.А.	54
ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ С РАЗЛИЧНЫМ ИСХОДНЫМ ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ ПРИ УПРУГОМ РАСТЯЖЕНИИ Поволоцкая А.М.	56
КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ ГРАДИЕНТНОГО СЛОЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ УГЛЕРОД- КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ Хохлова Е.Д.	58

МЕТОДИКА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СТАЛЕЙ ПЕРЛИТНОГО КЛАССА НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ИХ МИКРОСТРУКТУРЫ Магдеев Р.Г.	60
ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ Земсков Т.И.	62
АКУСТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРОСКОПИЯ ПРУЖИН ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ РЭЛЕЕВСКИХ ВОЛН Гущина Л.В.	64
МЕТОД АППРОКСИМАЦИИ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ СЕРДЕЧНИКОВ ФЕРРОЗОНДОВ Безкоровайный В.С.	66
ВОЛНОВОДНЫЙ АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ВАЛОВ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ С ОСЕВЫМ ОТВЕРСТИЕМ НА НАЛИЧИЕ ПРОДОЛЬНЫХ ВНУТРЕННИХ ТРЕЩИН Санникова Ю.О.	68
АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАСОСНЫХ ШТАНГ В ЗОНЕ ТЕРМОВЛИЯНИЯ Башарова А.Ф.	70
К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОХОДНОГО ЭМА- ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН Наговицын А.А.	72
ПОВЫШЕНИЕ СТРУКТУРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ СТАЛЕЙ Сандомирский С.Г.	74
ОЦЕНКА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ СТАЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ Манаев О.И.	76
ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ИЗМЕНЕНИЙ СОСТАВА ЖИДКИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД Коновалов С.И.	78
РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ТЕРМОЭДС ОТ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕРМОИНТЕРФЕЙСА Васильев И.М.	81
КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ МЕТОДОМ Мусихин А.С.	83
ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ ЭКРАНИРОВАННЫХ МАГНИТОИНДУКЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ КАРАНДАШНОГО ТИПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ТОЛЩИНОМЕРОВ ПОКРЫТИЙ Васильев А.Ю.	85

МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ ФАЗОВОГО СОСТАВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ АУСТЕНИТНО-ФЕРРИТНЫХ И АУСТЕНИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ Кочнев А.В.	88
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕТЕЛЬ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ В КАЧЕСТВЕ КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ ИХ КОРРОЗИОННОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ Соколов Р.А.	90
ОЦЕНКА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННОЙ СТАЛИ У8 ПО МАГНИТНЫМ ПАРАМЕТРАМ Щапова Е.А.	92
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИЛОЖЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛА СИЛОВОЙ ОБОЛОЧКИ, ВЫПОЛНЕННОЙ ИЗ СТАЛИ 20К Крючева К.Д.	94
АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТОЛСТОСТЕННЫХ ТРУБ Алифанова И.Е.	96
ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ГОЛОВНОЙ ВОЛНЫ В ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ РЕЛЬСАХ Казанцев С.В.	98
РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН Земсков Т.И.	100
ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТН-ВОЛН В АЛЮМИНИЕВОМ ЛЕНЕРЕ Санникова Ю.О.	102
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОРРОЗИОННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ НА СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ЛЭМБА Захарова Д.Д.	104
АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КАМЕР ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ Сысунов Н.Д.	106
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАТЫ СБОРА ДАННЫХ ДЛЯ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДЕФЕКТОСКОПА Дьячковский Е.И.	108
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА Ковалевич А.С.	110
РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ Артющенко А.П.	112

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ БЛОКОВ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН Павлухин Е.А.	114
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАСТРОЕК УЛЬТРАЗВУКОВОГО СКАНЕРА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ Широбокова А.Д.	116
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АРМАТУРЫ НА СКОБЕНАКЛАДКЕ ЭХО-МЕТОДОМ Николаев В.С.	118
ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ КАПИЛЛЯРНОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА Останин И.А.	121
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ Артемьев Р.Е.	123
ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА КАЧЕСТВО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ Григорьев Е.В.	126
ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ОБЪЕМНОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ Ильинский А.В.	128
АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ Егоров Р.А.	130
ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ И СПОСОБА ОБРАБОТКИ СИГНАЛА ДИНАМИЧЕСКИХ ТВЕРДОМЕРОВ ПО ШКАЛАМ ЛИБА Голев А.С.	131
ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ Шихов А.И.	133
РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОСНАСТКИ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЗАГОТОВОК ИЗ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ Колганов О.А.	135
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ НОРМАТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ АТТЕСТАЦИИ ЛАБОРАТОРИЙ И ПЕРСОНАЛА В ОБЛАСТИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ Леонтьук С.М.	137
РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ СИМУЛЯТОРА ДЕФЕКТΟΣКОПА Речкина Л.А.	139

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ КОНТРОЛЯ ТРЕХСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ВСТРОЕННЫМИ ВОЛОКОННЫМИ ДАТЧИКАМИ БРЭГГА

© 2021 г. Федотов Михаил Юрьевич, к.т.н., чл.-корр. РИА^{1*}

¹ – Российская инженерная академия (РИА), 125009, г. Москва, Газетный пер., д. 9, стр. 4

* - fedotovmyu@gmail.com

Создание перспективных образцов авиационной техники, обладающих уникальными характеристиками невозможно без широкого применения новых материалов и технологий. Говоря о высоконагруженных и ответственных крупногабаритных конструкциях, стоит отметить, что одной из наиболее важных тенденций развития является широкое применение полимерных композитных материалов (ПКМ), которые характеризуются высокими значениями удельной прочности и эксплуатационных свойств, обеспечивая при этом весовую эффективность в сравнении с традиционно применяемыми металлическими материалами и сплавами. Для дополнительного облегчения изделия, имея в виду, например, регулярные зоны крыла, зачастую применяют трехслойные панели, имеющие композитные обшивки, между которыми располагается сотовый наполнитель.

Применение таких конструкций требует обеспечения безопасности и надежности эксплуатации изделия, которые могут быть реализованы за счет применения современных методов и средств неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики [1, 2]. Одним из наиболее перспективных методов НК трехслойных и монолитных композитных конструкций является оптический метод [3] с использованием встроенных на стадии изготовления конструкции волоконных датчиков Брэгга (далее ВОД). Такой подход имеет очевидные преимущества перед классическими методами НК, т.к. позволяет осуществлять мониторинг фактического состояния конструкции как в процессе стендовых испытаний, так и, в перспективе, в эксплуатации.

Для ВОД, сформированных на основе волоконных решеток Брэгга, справедливо соотношение, известное в литературе [4] как условие фазового синхронизма

$$\lambda_B(\varepsilon, T) = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

где λ_B – резонансная длина волны ВОД, нм; ε – относительная деформация; T – температура, К; n_{eff} – эффективный показатель преломления сердцевины волоконного световода (ВС); Λ – период волоконной решетки Брэгга, нм.

Преобразуя (1), разложив в ряд Тейлора, с учетом допущения, что зависимости $\lambda_B(\varepsilon)$ и $\lambda_B(T)$ носят линейный характер и справедливо применим закон Гука, получим

выражение, в общем виде описывающее линейную модель оптического контроля

$$\Delta_B = K_\varepsilon \Delta\varepsilon + K_T \Delta T, \quad (2)$$

где Δ_B – относительное изменение длина волны ВОД, ppm; K_ε – линейный коэффициент деформационной чувствительности ВОД, ppm/ $\mu\varepsilon$; K_T – линейный коэффициент температурной чувствительности ВОД, ppm/К.

Здесь стоит пояснить, что в зарубежной литературе ppm (part per million) – сдвиг длины волны в миллионных долях длины волны, $\mu\varepsilon$ (microstrain) – деформация в отношении один к миллиону ($1\mu\varepsilon = 1$ мкм/м) – единицы измерения, которые довольно удобно использовать на практике в рассматриваемой области.

Приведены результаты экспериментальных исследований по выбору типа покрытия ВОД, предназначенных для интеграции в композитные обшивки, показано, что с точки зрения особенностей взаимодействия с компонентами ПКМ наиболее целесообразно использовать ВС в акрилатном покрытии. Исследованы способы формирования зоны ввода-вывода ВОД и сформулированы требования к организации топологии ВОД в трехслойных конструкциях. Изготовлены образцы и проведен оптический НК в соответствии с описанной моделью. По результатам НК экспериментально установлено, что с учетом разработанных требований к топологии, все ВОД сохранили работоспособность после формования изделия в едином технологическом цикле, при этом полученные зависимости показаний ВОД в процесс нагружения носят линейный характер, что подтверждает эффективность предложенной методики НК в процессе стендовых испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панков А.В., Токарь В.Л., Петронюк Ю.С., Левин В.М., Мороков Е.С., Рыжова Т.Б., Гулевский И.В. Определение характеристик трещиностойкости слоистых углепластиков на образцах без инициатора трещины с применением метода акустической микроскопии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 8. С. 58-65.
2. Бурков М.В., Еремин А.В., Бяков А.В., Любутин П.С., Панин С.В. Диагностика ударных повреждений монолитных и сотовых углепластиков с помощью ультразвуковых волн Лэмба // Дефектоскопия. 2021. № 2. С. 33-43.
3. Kinet D., Mégret P., Goossen K.W., Qiu L., Heider D., Caucheteur C. Fiber bragg grating sensors toward structural health monitoring in composite materials: challenges and solutions // Sensors. 2014. V 14. P.7394-7419.
4. Kersey A.D., Davis M.A., Patrick H.J., Leblanc M. Fiber grating sensors // IEEE J. Lightwave Tech. 1997. V. 15(8). P. 1442-1463.

ИЗМЕРЕНИЕ АНИЗОТРОПИИ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ УГЛЕГРАФИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2021 г. Павел Валентинович Соломенчук^{1*}, В.А. Сясько¹
¹ – ООО «Константа», 198098 Санкт-Петербург, Огородный пер., 21
* - pavel257@mail.ru, +7 (812) 372-29-03

Одним из применений углеграфитовых материалов является использование их в качестве скользящих электрических контактов, например, как материал для токоприемных контактных вставок пантографов (токоприемников) железнодорожного электроподвижного состава. Нормативными документами [1] регламентируется измерение удельного электрического сопротивление материала вставки. Известно [2], что углеграфитовые материалы обладают значительной анизотропией удельного электрического сопротивления ρ_i , характеризуемой параметром $\gamma = \sqrt{\rho_x/\rho_y}$, обусловленной как особенностями кристаллической решетки графита, так и технологическими особенностями изготовления конечного изделия. Корректный учет направления анизотропии ρ материала при проектировании вставки уменьшает её нагрев под действием электрического тока в процессе эксплуатации.

Стандартом [1] регламентируется использование контактного 4-х электродного метода измерения ρ [2], однако его применение весьма трудоемко, особенно при измерении ρ вставок непрямоугольной формы, когда для проведения измерений необходимо из вставки изготовить прямоугольный образец-свидетель. Классические бесконтактные вихретоковые методы измерения [3] не позволяют измерять анизотропию ρ . Существуют вихретоковые средства, предназначенные для неразрушающего контроля изделий, изготовленных из анизотропных материалов [4], однако они мало пригодны для измерения ρ , ввиду чего был разработан специализированный вихретоковый преобразователь (ВТП), оптимизированный для выполнения данной задачи (рис. 1).

Основной реализованной идеей является создание в объекте контроля (ОК) участка, на котором формируются линейные вихревые токи высокой плотности вдоль заданного направления с одновременным уменьшением плотности вихревых токов, направленных в перпендикулярном направлении на остальных участках ОК, что достигается применением пары обмоток возбуждения в форме сильно вытянутых прямоугольников 1, включенных в противофазе. линейный вихревой ток высокой плотности формируется между ними (зона 2 на рис. 1). Для измерения плотности вихревых токов, над этим участком ОК расположена прямоугольная измерительная обмотка 3, ориентированная тангенциально. Форма обмоток оптимизирована при их моделировании методом конечных элементов.

Для обеспечения возможности использования разработанного ВТП на практике в цеховых условиях используется анализ фазового сдвига вносимой ЭДС на обмотке 3, позволяющий реализовать отстройку от изменения зазора и наклона ВТП относительно ОК. Для этого выходной сигнал измерительной обмотки компенсируется аналогичным по конструкции компенсационным ВТП, расположенным в одном корпусе вместе с измерительным ВТП, но на значительном расстоянии от ОК.

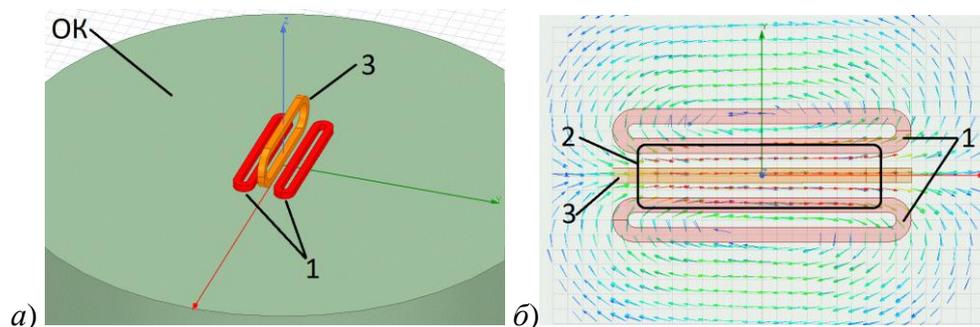


Рис. 1. Модель вихретокового преобразователя: а) внешний вид, б) распределение плотности вихревых токов в ОК под ВТП

На рис. 2 приведена угловая диаграмма зависимости показаний измерителя от угла поворота ВТП относительно направления наибольшего ρ .

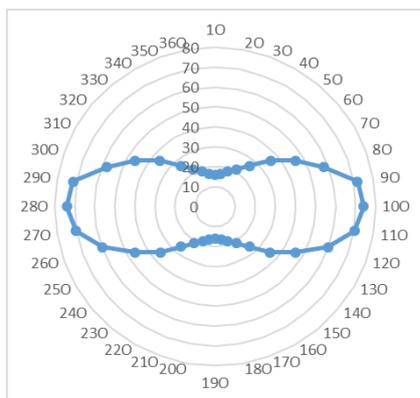


Рис.2. Угловая диаграмма зависимости показаний измерителя от угла поворота ВТП относительно направления наибольшего ρ при значении коэффициента анизотропии $\gamma = 3,16$ ($\rho_x = 10$ мкОм•м, $\rho_y = 100$ мкОм•м)

Расчёты и результаты моделирования подтверждены в процессе испытаний ВТП на мерах удельного электрического сопротивления углеродистых материалов.

В докладе подробно освещены вопросы оптимизации модели ВТП, описана структурная схема и конструкция ВТП. Освещены вопросы градуировки ВТП с использованием мер ρ углеродистых материалов, а так же технология их аттестации.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 32680-2014 Токосъемные элементы контактные токоприемников электроподвижного состава. –М: Стандартинформ, 2015. – 14 с. Введен с 2015-09-01.
2. Левашова А.И., Кравцов А.В. Химическая технология углеродных материалов. Томск: Изд-во ТПУ, 2008. 112 с.
3. ГОСТ 27999-87 Измерение удельной электрической проводимости цветных металлов вихретоковым методом. –М: Издательство стандартов, 2014. – 6 с. Введен с 1988-07-01.
4. Потанов А.И. и др. Вихретоковая дефектоскопия углепластиковых изделий. -М: Свен, 2014. С 104-112.

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСКОНТАКТНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СТИМУЛЯЦИИ И ЛАЗЕРНОГО ВИБРОСКАНИРОВАНИЯ

© 2021 г. Шпильной Виктор Юрьевич^{1*}, В.П. Вавилов^{1**}, Д.А. Дерусова^{1***},
Н.В. Дружинин^{2****}, А.Ю. Ямановская^{1*****}

¹Томский политехнический университет, 634028, Томск, ул. Савиных, 7

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634050, Томск, пр.
Академический, 2/4

* red@tpu.ru; ** vavilov@tpu.ru; *** vshpilnoy@list.ru; **** mikola@sibmail.com, ***** ayu4@tpu.ru

Современные полимерные композиционные материалы сочетают высокую прочность и малую массу, что способствует их широкому использованию практически во всех отраслях машиностроения. Наряду с развитием новых технологий возрастают требования к качеству продукции и обеспечению ее безопасной эксплуатации. Это определяет необходимость разработки новых и совершенствования существующих методов неразрушающего контроля [1-2].

Проведение ультразвукового неразрушающего контроля композиционных материалов бесконтактным способом требует повышения мощности акустического сигнала ввиду существенного затухания звука в воздушной среде. Эффективность испытаний в этом случае определяется эффективностью работы излучателя, а именно, величины передачи акустических колебаний через воздушную среду в объект исследования. Исходя из этого, разработчики устройств, работающих на основе магнестрикционных преобразователей, постоянно совершенствуют существующие технологии изготовления, а также конструкцию излучателей и используемых волноводов [3-4].

Настоящая работа посвящена исследованию направленности излучения мощного УЗ магнестрикционного излучателя с воздушной связью в сборке со ступенчатым титановым волноводом для задач бесконтактных ультразвуковых неразрушающих испытаний. Путем оценки взаимодействия инжектированных упругих волн с дефектными областями полимерного материала проведена оптимизация условий ввода ультразвука бесконтактным способом, исследовано влияние расстояния до точки ввода ультразвука, а также угла направленности излучателя к контролируемой поверхности полимерного материала, на вибрационный сигнал от дефекта. По результатам проведенных работ получено, что при уровне потребляемой электрической мощности магнестриктора 550Вт, амплитуда вводимой акустической мощности через единичную площадку пластины оргстекла может достигать 6 мВт на расстоянии от излучателя до объекта около 10 мм. Увеличение угла наклона излучателя на 15° и 30° к исследуемой поверхности приводит к

увеличению вводимой акустической мощности соответственно в 3 и 4 раза. Акустическая энергии указанной величины является достаточной для локального увеличения амплитуды вибраций частиц среды в области неоднородности в результате взаимодействия распространяющейся упругой волны с дефектом. При анализе условий нагружения несквозного отверстия прямоугольной формы в пластине оргстекла было получено, что максимальное усиление вибраций в дефекте по отношению к бездефектной величине наблюдалось при минимальном расстоянии до излучателя, а увеличение угла наклона излучателя до 30° приводит к увеличению амплитуды вибраций частиц среды в области неоднородности до трех раз. Следует также отметить, что уменьшение уровня вводимой акустической энергии приводит к снижению достоверности результатов определения геометрических размеров неоднородности. Однако область дефекта проявляется в виде соответствующей отметки даже при минимальной величине вводимой акустической энергии, которая составляла 5 мВт в рамках настоящего эксперимента. Результаты практического использования бесконтактной УЗ стимуляции для обнаружения ударного повреждения энергией 16 Дж в углепластиковом композите позволили оценить геометрические размеры неоднородности и подтвердили возможность использования бесконтактных магнитострикционных излучателей для обнаружения дефектов указанного типа.

Измерение диаграммы направленности бесконтактного магнитострикционного излучателя с использованием техники лазерной виброметрии позволило оптимизировать условия проведения неразрушающего контроля полимерных и композиционных материалов с использованием бесконтактной УЗ стимуляции и лазерного вибросканирования.

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук МК-1221.2021.4

ЛИТЕРАТУРА

1. *Post W., Kersemans M., Solodov I., Van Den Abeele K., García S., van der Zwaag S.* Non-destructive monitoring of delamination healing of a CFRP composite with a thermoplastic ionomer interlayer// *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. V. 101. 2017. P. 243 –253
2. *Solodov I., Döring D., Busse G.* Air-coupled laser vibrometry: Analysis and applications// *Applied Optics*. V. 48. No.7. 2009. P.C33—C3
3. *Nad M.* Ultrasonic horn design for ultrasonic machining technologies // *Applied and Computational Mechanics*. V. 4. 2010. P. 79–88
4. *Jagadish, Amitava Ray.* Design and performance analysis of ultrasonic horn with a longitudinally changing rectangular cross section for USM using finite element analysis // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. V. 40. No. 7. 2018. article number 359

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ СВЧ-МУЛЬТИПАКТОРНОГО РАЗРЯДА

© 2021 г. Гурами Николаевич Ахобадзе

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 117997, Москва, ул.

Профсоюзная, 65

ahogur@yandex.ru

Тел. 8-905-72-777-39

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ТЕЗИСОВ

Проблема оценки технического состояния и надежности опорно-стрележной и подвесной изоляции актуальна, и востребована практикой, что подтверждается ежедневным опытом и статистикой эксплуатации различных типов изоляторов, как на энергетических предприятиях, так и на объектах железных дорог.

Предлагаемая работа направлена на решение задачи диагностики технического состояния высоковольтных изоляторов на основе мультипакторного разряда на их наружной поверхности с последующим уменьшением электромагнитного сигнала, как информационного параметра.

Суть диагностики основывается на использовании эффекта мультипакторного разряда, представляющего собой явление в радиочастотных устройствах, в которых при определенных условиях, вторичная электронная эмиссия в резонансе с переменным электрическим полем приводит к экспоненциальному размножению электронов, приводящих к повреждению (разрушению) радиочастотного устройства.

Представляемая диагностика высоковольтного изолятора предусматривает помещение высоковольтного изолятора в вакуумированный круглый волновод с закрывающими и открывающими торцами (являющимся одновременно входом и выходом волновода для электромагнитных колебаний) и воздействие сверхвысокочастотной мощности на расположенный в полости волновода контролируемый изолятор. Предварительно в данном волноводе устанавливается пороговый уровень (в зависимости от материала волновода, его сечения и длины, а также типа электромагнитной волны в волноводе) СВЧ - мощности, приводящей к возникновению мультипакторного разряда в электромагнитном поле волновода. После этого для контроля прочности волновода, по нему пропускается СВЧ-энергия ниже порогового значения мощности, не приводящей к возникновению мультипакторного разряда волновода. Ввод в волновод с изолятором СВЧ-энергии больше порогового значения, приведет к тому, что на наружной поверхности изолятора, как диэлектрического материала, возникнет мультипакторный разряд, приводящий к падению прошедшего по волноводу СВЧ - сигнала. В результате этого, в полости волновода с изолятором будет иметь место полное затухание сигнала. Это

объясняется тем, что в данном случае, при распространении бегущей волны по волноводу, от поверхности изолятора возникает многократное отражение, приводящее к наличию градиента сверхвысокочастотного потенциала, в результате чего возникает мультипакторный разряд (десорбция газа с поверхности изолятора и формирование плазмы, поглощающей электромагнитной энергии) на наружной поверхности контролируемого материала. Следовательно, отсутствием сигнала (минимальное значение) на входе приемной электромагнитной антенны, подключенной к выходу волновода, можно констатировать мультипакторный разряд на поверхности высоковольтного изолятора.

В рассматриваемом случае принимается, что по степени возникновения мультипакторного разряда, высоковольтный изолятор уступает круглому волноводу, т.е. при одной то же энергии в волноводе с изолятором, по разрушительным свойствам, волновод электрически должен быть прочным, чем изолятор.

Как известно высоковольтные изоляторы бывают дефектными (например, со скрытыми трещинами) и бездефектными. Как правило, дефектные изоляторы имеют пониженную электрическую прочность по сравнению с бездефектными. В силу этого отсюда можно сделать заключение о том, что при облучении (воздействии) высоковольтных изоляторов в волноводе электромагнитными волнами, мультипакторный разряд у дефектных изоляторов возникнет относительно пораньше, чем у бездефектных (при одной то же СВЧ-мощности и частоте электромагнитных колебаний).

В работе на основе сравнения сигналов на выходе волновода с дефектным и бездефектным изоляторами представляется методика, позволяющая диагностировать техническое состояние дефектных изоляторов с уровнем выходной мощности (не достигшим уровнем мощности бездефектных изоляторов) за счет преждевременного мультипакторного разряда на их наружной поверхности относительно к уровню выходной мощности бездефектных изоляторов. Установлены критерии уровней входной мощности волновода, приводящие мультипакторного разряда на наружных поверхностях бездефектного и дефектного изоляторов, позволяющие вычислить техническое состояние находящегося в волноводе неизвестного изолятора в зависимости от размера и формы дефекта.

Предлагается математическая модель мультипакторного разряда в электромагнитном поле бегущей волны по круглому волноводу из нержавеющей стали с учетом соотношения размеров стенок волновода и диапазона передаваемых мощностей.

Таким образом, полученные результаты указывают на необходимость учета возможности возникновения СВЧ - мультипакторного разряда в круглых волноводах с изолятором при разработке и реализации эффективных способов их диагностики.

РАЗРАБОТКА ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГЛУБИНЫ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ТОРЦЕВЫХ СВАРНЫХ ШВОВ СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН

© 2021 г. В.А. Сясько¹, Павел Валентинович Соломенчук^{1*}, А.Е. Ивкин¹,
А.Е. Горбунов¹

¹ – ООО «Константа», 198098 Санкт-Петербург, Огородный пер., 21

* - pavel257@mail.ru, +7 (812) 372-29-03

В конструкции мощных резистивных элементов коммутующей аппаратуры электропитания и защиты сверхпроводящей магнитной системы реактора ИТЭР для соединения стальных пластин применяются торцевые сварные швы. Сварные швы выполняются по технологии аргонодуговой сварки, материал свариваемых пластин сталь 08Ю или AISI 321. Конструкция сварных швов представлена на рис. 1, (а) внешний вид резистивного элемента приведен на рис. 1, (б).

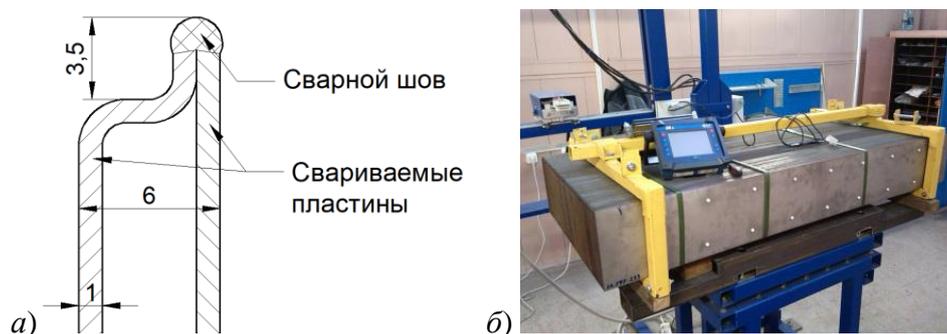


Рис. 1. Конструкция сварного шва (а) и внешний вид резистивного элемента (б)

Для контроля глубины проплавления выбран фазовый метод вихретокового вида НК. Для уменьшения магнитной проницаемости металла пластин и сварного шва из стали 08Ю, с целью увеличения глубины проникновения вихревых токов δ до необходимого значения, используется намагничивание до насыщения с применением электромагнита. При контроле сварного шва из стали AISI 321 намагничивание применяется с целью насыщения мартенситных включений в основном металле и сварном шве для увеличения соотношения сигнал/шум при проведении вихретокового контроля.

Проведенные исследования магнитных свойств стали 08Ю на кольцевых и цилиндрических образцах показали, что для снижения относительной магнитной проницаемости с начального значения $\mu \approx 610$ о.е. до приемлемого значения $\mu \approx 10$ о.е. потребуется намагничивание постоянным магнитным полем с индукцией 2,2 Тл. При этом, уменьшение μ до 10 о.е. при намагничивании в постоянном магнитном поле электромагнита в сочетании с уменьшением μ для слабого переменного магнитного поля вихретокового преобразователя (ВТП) при частоте возбуждения 50 кГц обеспечило δ ,

позволяющую провести контроль глубины проплавления сварного шва до 1,4 мм.

Разработанный ВТП предназначен для работы в составе роботизированной установки с 6-осевым манипулятором, грузоподъемность которого 3 -11 кг (в зависимости от положения), что обуславливает необходимость оптимизации веса ВТП. На рис. 2, (а) представлен эскиз ВТП, на рис. 2, (б) 3Д-модель ВТП.

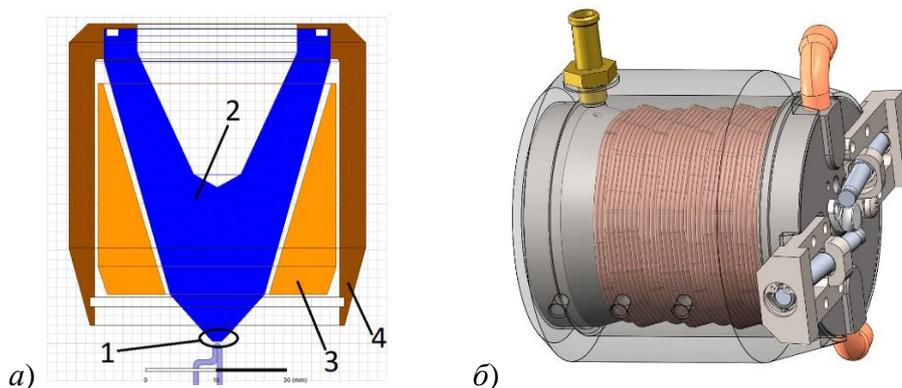


Рис.2. Конструкция вихрекового преобразователя (а) и его 3Д-модель (б)

Катушки чувствительного элемента абсолютного трансформаторного вихрекового преобразователя 1 расположены на кончике сердечника. Сердечник 2 изготовлен из прецизионного сплава 49КФ, характеризующегося высокой магнитной индукцией технического насыщения. Для исключения влияния вихревых токов в сердечнике на сигналы ВТП, в сердечнике возле катушек чувствительного элемента изготовлены узкие прорези. На сердечник наматывается катушка электромагнита 3. Экран 4 предназначен для уменьшения сопротивления магнитной цепи электромагнита. Форма элементов магнитной цепи оптимизирована методом конечных элементов с применением алгоритмов автоматической оптимизации методом Ньютона.

Ввиду значительного влияния размагничивающего фактора, обусловленного формой контролируемого участка сварного шва, для создания магнитного поля в сварном шве с индукцией 2,2 Тл в данной конструкции требуется магнитодвижущая сила порядка 5000 АВ. Для её создания используется катушка, содержащая 197 витков провода диаметром 1 мм. В диапазоне рабочих температур от + 20 до + 80 °С на проводе катушки выделяется до 570 Дж тепла, для отвода которого используется система жидкостного охлаждения.

В докладе подробно рассмотрены вопросы моделирования чувствительного элемента ВТП и системы намагничивания, описаны их конструкция и технологии, примененные для разработки и изготовления представленного вихрекового преобразователя, а также методика проведения контроля в составе роботизированного комплекса

РЕЗУЛЬТАТЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК И ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

© 2020 г. Костюхин Александр Сергеевич^{1*}, В.В. Малый^{1**}, Е. А. Павлухин^{1***}, А. Е. Хошев^{1****},

1 – Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А
* - noxx9999@yandex.ru; ** - banqvalera@mail.ru; *** - zhekakbr@gmail.com; **** - severenarwhal@gmail.com

Введение.

К качеству паяных соединений предъявляются высокие требования по надежности. Это связано с высокотемпературными режимами работы элементов теплообменных аппаратов (ТА) и соответствующими высокими нагрузками, при которых наличие в структуре соединения дефекта может привести к разрушению всего изделия. Характерными дефектами паяных соединений камер ЖРД являются неспай и непропай. Как показывает практика минимальный размер площади неспая (непропая), который необходимо выявлять, составляет около 1 мм².

Существуют технологии контроля паяных соединений элементов ТА, в которых применяются неразрушающие методы, к которым относятся, например, ультразвуковой эхо-метод [1-3].

Однако, сплошной контроль элементов ТА при помощи традиционного эхо-метода не рационален, так как скорость контроля ограничена размерами выявляемых дефектов (1 мм²) и составляет единицы миллиметров в минуту. Кроме того, результаты контроля представляются в виде А и В-сканов сложных для интерпретации.

С целью увеличения скорости сканирования без потери возможности уверенного выявления дефектов типа «неспай» и «непропай», предложено применить фазированные антенные решетки (ФАР) как средство реализации ультразвукового эхо-метода.

Цель работы. Обоснование возможности комбинированного применения ФАР и оптико-акустического преобразователя (ОАП) для достоверного выявления дефектов паяных соединений элементов ТА.

Базовые положения исследования. Научно-методические основы контроля паяных соединений базируются на применении ультразвукового эхо-метода неразрушающего контроля с использованием технологии ФАР. При подтверждении достоверности результатов контроля использовались методы и средства металлографического анализа. Исследования акустического поля ФАР проводились с помощью средств компьютерного моделирования.

Промежуточные результаты. Обеспечена предельная чувствительность ультразвукового контроля при использовании ФАР не хуже 1 мм², произведена проверка достоверности результатов контроля, отработаны технологические приемы ультразвукового контроля на специально изготовленных образцах и на реальном изделии.

Основной результат. Разработаны научно-методические основы технологии ультразвукового контроля качества паяных соединений элементов ТА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быченко В. А., Кинжагулов И. Ю. Лазерно-ультразвуковой контроль тонкостенных паяных соединений камер жидкостных ракетных двигателей // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2011. – Т. 54. – № 7.
2. Астрединова Н.В., Баринов А.В., Сергеев Д.С. Возможность применения лазерно-ультразвуковой диагностики для контроля качества паяных соединений камер жидкостных ракетных двигателей // Вестник ВГУИТ. 2014. №3 (61).
3. Гусев В. Э., Карабутов А. А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991. 304 с.

ПРЕДИКТИВНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ПОИСКЕ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ УЧАСТКОВ ЗАРОЖДЕНИЯ ДЕФЕКТОВ КРН

© 2021 г. Алексей Николаевич Кузьмин^{1*}, **А.В. Жуков**^{1**}

¹ – ООО «Стратегия НК», 620014 Екатеринбург, пер. Северный, № 5а

* - 11kan@strategnk.ru; ** - 11zav@strategnk.ru

Цифровизация диагностических систем наряду с использованием искусственного интеллекта являются современным мировым трендом. В частности, анализ результатов диагностики в многомерном пространстве диагностических признаков позволяет идентифицировать опасные дефекты, которые развиваются в процессе длительной эксплуатации. Отдельный интерес представляет задача выявления на ранней стадии развития дефектов коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) магистральных газопроводов (МГ).

Одним из методов, позволяющим получить непосредственно информацию о стадиях развития и скорости роста дефектов КРН, является метод акустической эмиссии (АЭ). Известно, что образование и рост дефектов КРН имеет прямую взаимосвязь с повышенными значениями локальных полей напряжений, возникающих на участках газопроводов в результате их длительной эксплуатации. В частности, данный факт определяет высокие потенциальные возможности развития метода АЭ прежде всего с точки зрения оценки вероятности наступления предельного состояния объекта [1].

Целью настоящей работы являлось практическое обоснование возможности использования метода АЭ для выявления потенциально опасных мест зарождения КРН на эксплуатируемых объектах магистральных газопроводов и построение на этой основе технологии автоматизированного контроля таких участков. Основной проблемой построения технологии является формирование набора диагностических признаков на основе результатов комплексного технического диагностирования объекта контроля.

В работе представлены основные инновационные принципы новой технологии контроля, которые заключаются в применении систем цифровой фильтрации данных АЭ, последующей процедуры обнаружения и выделения полезного сигнала от дефекта, формирования многомерного пространства признаков наличия дефектов, а также построения системы поддержки принятия решения, построенной на принципах машинного обучения [2]. Сделан вывод, что при комплексном техническом диагностировании участков МГ с применением метода АЭ, появляется дополнительная возможность выявления с высокой степенью вероятности потенциально опасных зон зарождения КРН задолго до наступления предельного состояния объекта контроля. Данный способ оценки технического состояния трубопроводов с применением метода АЭ может быть применен в

процессе как периодического контроля, так и в условиях мониторинга технического состояния участков газопровода.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кузьмин А.Н., Жуков А.В., Давыдова Д.Г., Шитов Д.В., Аксельрод Е.Г.* Акустико-эмиссионный контроль при оценке технического состояния оборудования нефтегазового комплекса. // В мире НК. 2017, Т. 20. No. 1. С. 76 — 85.
2. *Кочарян А.Г., Соколов С.И., Шипилов А.В., Кузьмин А.Н., Жуков А.В.* Инновационная технология акустико-эмиссионного контроля линейных объектов магистральных трубопроводов // Газовая промышленность. 2020. № 6. С. 106—115.

О ВЗАИМОСВЯЗИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ.

© 2021 г. Марат Равилевич Тютин^{1*}, Л.Р. Ботвина^{1**}

¹ – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН), 119334, г. Москва, Ленинский проспект, 49

* - mtyutin@imet.ac.ru; ** - lbotvina@imet.ac.ru

Целью данного исследования являлось установление взаимосвязи коэрцитивной силы и вихретокового параметра с поврежденностью широко распространенных в промышленности конструкционных сталей 20, 45 и 15Х2ГМФ. Для этого проведены испытания на растяжение плоских образцов размерами 220×40×6 мм и 184×20×5 мм [1,2]. Поврежденность образцов оценивали методом оптической микроскопии на разных стадиях нагружения во время остановок нагружения. В качестве критерия поврежденности использовали относительную площадь поврежденной поверхности (S^* , %), равную отношению площади поверхности, занимаемой дефектами на полученном изображении, к площади кадра.

Во время пауз при растяжении образцов измеряли вихретоковый параметр ($H_{ВТ}$) с применением дефектоскопа ВД-90НП и коэрцитивную силу (H_C) магнитным структуроскопом МС-10.

На рис. 1, а представлены зависимости относительной площади поврежденной поверхности S^* от относительной деформации ε^* для исследуемых сталей. Относительную деформацию определяли как отношение текущей деформации к деформации разрушения образца. Как можно видеть, на начальном этапе нагружения поврежденность образца из стали 45 наибольшая. С увеличением деформации поврежденность растет по экспоненциальной зависимости для всех исследуемых сталей, причем наиболее интенсивный рост поврежденности наблюдается в образцах из стали 15Х2ГМФ (рис. 1, а).

Исследование показало, что достижение предела текучести и предела прочности вызывает соответствующие изменения коэрцитивной силы и вихретокового параметра [1, 2]. Характер изменения этих параметров в существенной мере зависит от структуры материала. Если коэрцитивная сила при растяжении ферритных сталей 20 и 45 практически монотонно растет с деформацией [1], то в бейнитной стали 15Х2ГМФ до достижения предела прочности наблюдается падение коэрцитивной силы, а потом резкий рост вплоть до разрушения образца [2]. Вихретоковый параметр на разных стадиях разрушения меняется немонотонно, наблюдаются участки его роста и падения [1, 2], что

затрудняет установление корреляции этого параметра с поврежденностью. Для установления зависимости $H_{BT} - S^*$ необходимо выделять стадии разрушения, на которых наблюдается согласованное изменение этих параметров.

По экспериментальным результатам построены зависимости коэрцитивной силы H_C от относительной площади поврежденной поверхности S^* для исследуемых сталей (рис. 1, б). Как видно на рис. 1, б, коэрцитивная сила увеличивается с ростом поврежденности по линейной зависимости для ферритно-перлитных сталей 20 и 45. Для бейнитной стали 15Х2ГМФ эта зависимость описывается экспоненциальным соотношением.

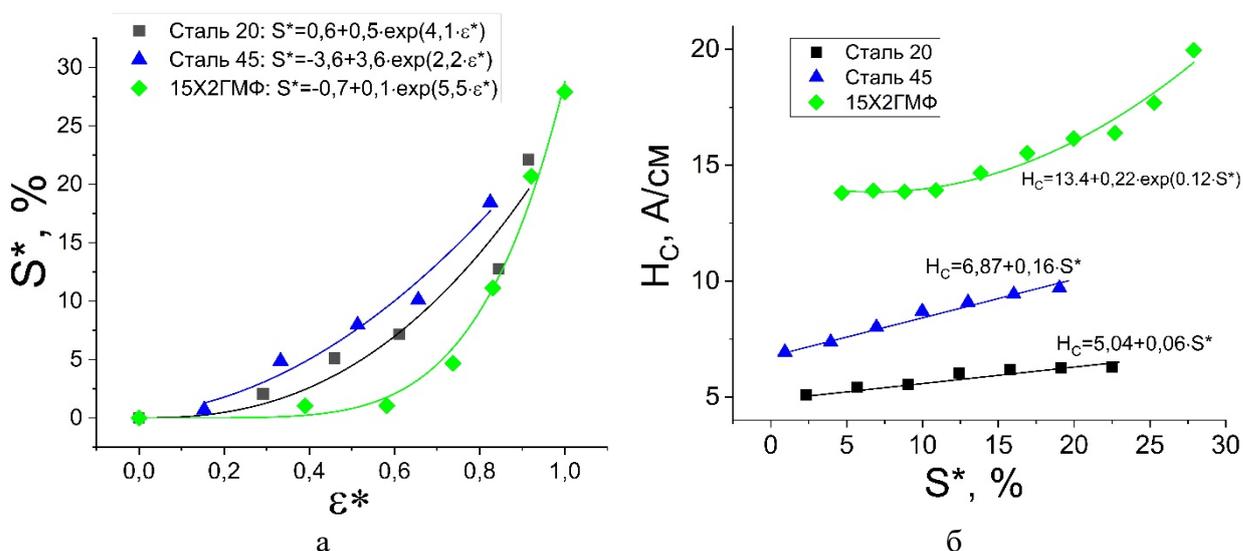


Рис. 1. Зависимости площади поврежденной поверхности (S^*) от относительной деформации ε^* (а) и зависимости коэрцитивной силы H_C от относительной площади поврежденной поверхности S^* в образцах из сталей 20, 45 и 15ХГ2МФ (б)

Таким образом, в результате проведенного анализа получены корреляционные зависимости коэрцитивной силы от параметра поврежденности, которые могут быть использованы для оценки состояния материала при его деформации или эксплуатации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №19-19-00674).

ЛИТЕРАТУРА

1. Tyutin M.R., Botvina L.R., Petersen T.B. Tensile damage evolution of structural steels with different structure // Procedia Struct. Integr. Elsevier B.V., 2020. Т. 28. С. 2148–2156. Doi: 10.1016/j.prostr.2020.11.042.
2. Ботвина Л.Р., Тютин М.Р., Левин В.П. и др. Механические и физические свойства, механизмы разрушения и остаточная прочность стали 15Х2ГМФ, используемой для изготовления нефтяных насосных штанг // Деформация и разрушение материалов. 2020. № 9. С. 22–34. Doi: 10.31044/1814-4632-2020-9-22-34.

ОЦЕНКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ БЕТОННЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ВНЕШНЕМ ДЕТЕРМИНИРОВАННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

© 2021 г. **Евгений Карлович Помишин^{1*}**, **М. В. Петров^{1**}**, **Д. Д. Данн^{1***}**

¹ – *Томский Политехнический Университет, 634050, г.Томск, пр. Ленина, 30*

* - e-mail: pnh1@tpu.ru ; ** - e-mail: mvp17@tpu.ru ;

*** - e-mail: dddann@tpu.ru

Трещины являются основной причиной разрушения бетонных изделий, поэтому задача определения трещиноватости бетонных изделий является очень важной. Для решения такой задачи может быть применено явление акустоэлектрических преобразований.

Исследования проводились на лабораторной измерительной установке позволяющей регистрировать электромагнитный отклик из гетерогенных материалов при акустическом детерминированном воздействии.

Для моделирования влияния дефектов в виде трещин на параметры электромагнитного отклика при внешнем детерминированном воздействии были использованы образцы в форме куба размером 100x100x100 из цементно-песчаной смеси в которые были помещены пластины из полиэтилена разного имитирующие трещины. Искусственные трещины помещались во время изготовления образцов, в жидкий раствор. После того как структура образцов сформировалась, проводились исследования влияния количества расположенных искусственных трещин на параметры электромагнитного отклика из них. Результаты измерений показали, что сигнал из образца изменяется по мере увеличения количества искусственных трещин, это хорошо видно на амплитудно-частотных характеристиках этих сигналов.

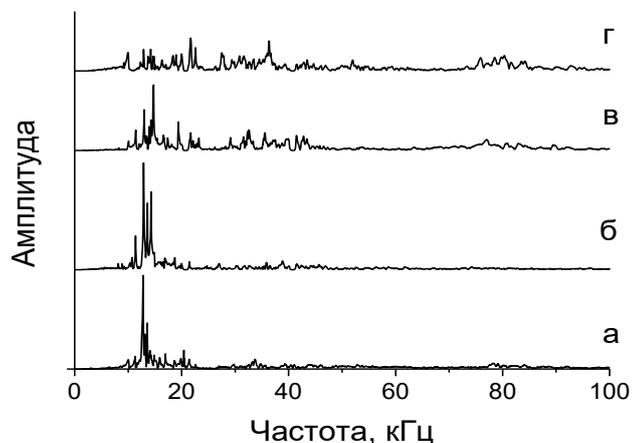


Рисунок 1. Амплитудно-частотные характеристики электрических сигналов из цементно-песчаных моделей с разным количеством трещи, где а – 0 трещин, б – 5 трещин, в – 10 трещин, г - 30 трещин.

Из рисунка видно, что уменьшается амплитуда основной спектральной составляющей и появляются составляющие в более высокочастотной области. Чтобы оценить это изменение использовался метод корреляционного анализа, который показал, что коэффициент корреляции уменьшается при сравнении образцов с трещинами с контрольным образцом не имеющим искусственные трещины.

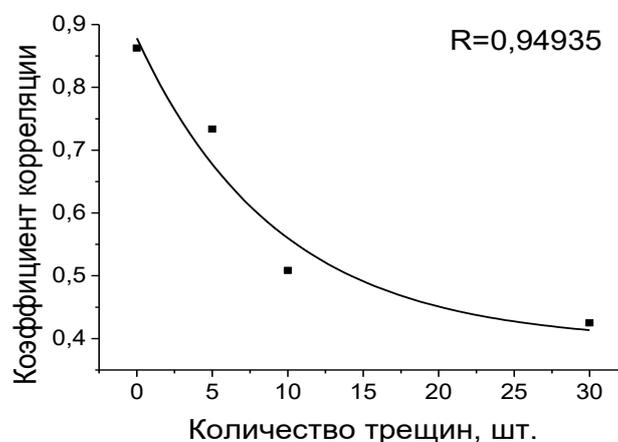


Рисунок 2. Зависимость коэффициента корреляции от концентрации трещин.

Из рисунка видно, что данный метод обладает возможностью определять количество искусственных трещин в материале.

Проведенные исследования показывают, что электрическим откликом на ударное возбуждение можно оценивать не только концентрацию трещин в материале, но и определять расположение дефектной области.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант 20-79-10156.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bespal'ko, A. A., Surzhikov, A. A., Yavorovich, L. V.* Study of Mechanoelectrical Transformation in Rocks Under Dynamic Impact // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2007, V1, p. 9.
2. *Bespal'ko, A.A., Isaev, Y.N., Yavorovich, L.V.* Transformation of acoustic pulses into electromagnetic response in stratified and damaged structures // Journal of Mining Science. 2016, V52. Is2. P. 279-285.
3. *Fursa, T.V., Dann, D.D., Petrov, M.V., Lykov, A.E.* Evaluation of Damage in Concrete Under Uniaxial Compression by Measuring Electric Response to Mechanical Impact // Journal of Nondestructive Evaluation. 2017. V.36 Is.2

К ВОПРОСУ ОБ ИЗУЧЕНИИ ВЛИЯНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО НАГРУЖЕНИЯ НА МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

© 2021 г. Александр Николаевич Мушников*, С.М. Задворкин**, Е.А. Путилова***
Институт машиноведения УрО РАН, 620049, Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34
* - mushnikov@imach.uran.ru, ** - zadvorkin@imach.uran.ru, *** - tuevaevgenya@mail.ru

Исследованиям влияния упругого деформирования одноосным растяжением и сжатием на процессы намагничивания и перемагничивания ферромагнитных материалов посвящено большое количество работ (см. обзоры в [1, 2]). Исследования поведения магнитных характеристик при двухосных и трехосных видах нагружений, как правило, ограничиваются частными случаями, характерными для практики. Например, нагружение стального сосуда внутренним давлением сформирует (в предположении о тонкостенности) двухосное напряженное состояние, которое может быть оценено магнитными методами [3]. Но при подобных испытаниях главные напряжения взаимосвязаны и определяются одной только величиной внутреннего давления, а их соотношение жестко связано с геометрией конструкции.

В работах [4-6] исследовали изменения магнитных характеристик различных конструкционных сталей при одновременном воздействии на полый цилиндрический образец одноосным растяжением/сжатием, кручением и внутренним давлением. Такая схема нагружения моделирует, в частности, возможные нагрузки при эксплуатации трубопроводов. Но, помимо практического аспекта, данный вид экспериментов может быть полезен для развития теоретических основ магнитных методов неразрушающего контроля трехосного напряженного состояния. В настоящем докладе показано, что комбинация растяжения/сжатия с кручением и внутренним давлением позволяет получить на рабочей части цилиндрического образца три ненулевых главных напряжения, причем их величины не будут взаимозависимы. При этом возможно варьировать направление первого (т.е. наибольшего) главного напряжения по отношению к продольной оси образца от 0 до 90°.

Схема эксперимента все же имеет ряд ограничений: невозможно создать трехстороннее растяжение или трехстороннее сжатие (т.е. знак одного из главных напряжений будет отличаться от двух других); диапазон изменений второго главного напряжения относительно мал по сравнению с диапазонами первого и третьего главных напряжений.

Фактически на характеристики материала влияют не напряжения, а связанные с ними деформации, которые для упругого случая легко рассчитать, используя обобщенный закон Гука. В работе показано, что при заданной интенсивности напряжений наибольшие

изменения магнитных характеристик наблюдаются при измерениях в направлении наибольшей упругой деформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Костин В.Н., Царькова Т.П., Ничипурук А.П., Лоскутов В.Е., Лопатин В.В., Костин К.В. Необратимые изменения намагниченности как индикаторы напряженно-деформированного состояния ферромагнитных объектов // Дефектоскопия. 2009. № 11. С. 54-67.
2. Горкунов Э.С., Мушников А.Н. Магнитные методы оценки упругих напряжений в ферромагнитных сталях (обзор) // Контроль. Диагностика. 2020. Т. 23. № 12. С. 4-23.
3. Кулак С.М., Новиков В.Ф., Проботюк В.В., Ваценок С.М., Фурсов Е.С. Магнитный контроль напряженного состояния стенки газового сепаратора при его гидроиспытаниях // Дефектоскопия. 2019. № 3. С. 38-45.
4. Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Мушников А.Н., Смирнов С.В., Якушенко Е.И. Влияние механических напряжений на магнитные характеристики трубной стали // Прикладная механика и техническая физика. 2014. Т. 55. № 3. С. 181-191.
5. Горкунов Э.С., Якушенко Е.И., Задворкин С.М., Мушников А.Н. Влияние упругих деформаций на магнитные характеристики хромоникелевых сталей // Физика металлов и металловедение. 2015. Т. 116. № 2. С. 156.
6. Горкунов Э.С., Путилова Е.А., Задворкин С.М., Макаров А.В., Печеркина Н.Л., Калинин Г.Ю., Мушникова С.Ю., Фомина О.В. Особенности поведения магнитных характеристик перспективных азотсодержащих сталей при упругопластической деформации // Физика металлов и металловедение. 2015. Т. 116. №8. С. 884–896.

МАГНИТНО-СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ 3D СТАЛИ 09Г2С

© 2021 г. Александр Петрович Ничипурук*, А.Н. Сташков**, Е.А. Шапова***,
Н.В. Казанцева****

*Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, 620108, Екатеринбург, ул.
С. Ковалевской, 18*

* - *nichip@imp.uran.ru*, ** - *stashkov@imp.uran.ru*, *** - *schapova@imp.uran.ru*, **** -
kazantseva@imp.uran.ru

Селективное лазерное сплавление (СЛС) является одной из технологий 3D печати металлами [1]. Технология СЛС используется для получения деталей сложной формы без дальнейшей механической обработки. Исходным сырьем в СЛС является металлический порошок. Большое количество работ посвящено исследованию структуры и механических свойств 3D изделий. Основной проблемой технологии СЛС является то, что в процессе изготовления в силу температурного градиента при нагреве и охлаждении локального участка в детали возникают остаточные механические напряжения. Эти напряжения могут приводить к короблению и разрушению деталей. Уменьшение уровня механических напряжений после 3D печати является важной нерешенной проблемой. В 3D сталях возможно применять для снятия внутренних механических напряжений термообработку. Однако для каждого материала режимы и виды термообработки должны подбираться индивидуально. После термообработки для аттестации качества готовых деталей целесообразно применять физические неразрушающие методы. Для ферромагнитных материалов целесообразно применять магнитный структурный анализ.

Целью данной работы являлось экспериментальное изучение структуры, магнитных и электрических свойств образцов из 3D стали 09Г2С после различных термообработок и сравнение со свойствами литой стали 09Г2С.

Эксперименты проводились на образцах из конструкционной низколегированной стали 09Г2С (0,1% С; 1,5% Мп; <1% Si). Образцы из порошка стали 09Г2С были изготовлены с помощью метода селективного лазерного сплавления в среде азота. Размеры фракции исходного порошка составляли от 10 до 45 мкм. Мощность лазера – 200 Вт. Площадь пятна лазера – 50 мкм. Стол для построения подогревался до 100 °С. После изготовления образцы отжигались вместе со столом при температуре 350 °С в течение 1 и 3 часов. После отжига образцы отрезались от стола на электроэрозионном станке. Часть образцов была нормализована (нагрев до 980 °С, выдержка 30 минут, охлаждение на воздухе). После термообработки образцы шлифовались с малой подачей шлифовального круга и водяным охлаждением. Размер образцов составил 4x9x120 мм³. Для исследования структуры с разных граней образцов на электроэрозионном станке вырезались фрагменты. Структурные исследования проводились на оптическом, сканирующем и

просвечивающем микроскопах. Измерения петель магнитного гистерезиса проводили в пермеамetre с помощью измерительного комплекса REMAGRAPH C-500 (Magnet-Physik Dr. Steingroever GmbH). Определены коэрцитивная сила, остаточная и максимальная индукции, максимальная магнитная проницаемость.

В результате структурных исследований и измерения магнитных свойств образцов из стали 09Г2С, изготовленных методом селективного лазерного сплавления после отжига и нормализации, установлено, что структура и магнитные свойства отожженной 3D стали 09Г2С существенно отличаются от структуры и магнитных свойств как литой стали, так и 3D стали, подвергнутой дополнительной нормализации. На основе анализа экспериментальных полевых зависимостей дифференциальной магнитной восприимчивости [2] литой и 3D стали 09Г2С определены критические поля смещения 90- и 180-градусных доменных границ, а также поле наведенной магнитной анизотропии [3], обусловленной внутренними механическими напряжениями и неферромагнитными выделениями (карбидами). По магнитометрическим данным и рентгенографическим исследованиям оценены внутренние механические напряжения: наибольшие значения получились в образцах из 3D стали, подвергнутой после изготовления отжигу в течение 3 часов. Дополнительная нормализация при 980 °С уменьшила внутренние микронапряжения в 3D образцах до уровня литой стали 09Г2С.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Yadollahi, N. Shamsaei, S.M. Thompson, A. Elwany, L. Bian Effects of building orientation and heat treatment on fatigue behavior of selective laser melted 17-4 PH stainless steel // International Journal of Fatigue. 2017. Vol. 94. P. 218-235.
2. Кулеев В.Г., Сташков А.Н., Царькова Т.П., Ничипурук А.П. Экспериментальное нахождение критических полей смещения 90-градусных доменных границ в пластически деформированных малоуглеродистых сталях // Дефектоскопия. 2018. №10. С. 37-41.
3. Розенфельд Е.В., Ничипурук А.П. Модель Прейзаха для ферромагнетиков с кубической симметрией. I. Теория // ФММ. 1997. Т. 84. с. 29-46.

ОПЫТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОЙ ТВЧ-ЗАКАЛКИ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ ВИНТОВ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2021 г. Сергей Григорьевич Сандомирский^{1*}, В. Л. Цукерман², Г. Н. Забавский³

¹ – Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Академическая, 12

² – Институт прикладной физики НАН Беларуси, 220072, Минск, Академическая, 16

³ – Филиал ОАО Управляющая компания холдинга «МИНСКИЙ МОТОРНЫЙ ЗАВОД» в г. Столбцы), 222666, Минская обл., г. Столбцы, ул. Машиностроителей, 1

* - sand_work@mail.ru

Многие ответственные изделия подвергаются локальной термической обработке. Массовой деталью дизельных двигателей Минского моторного завода, подвергаемой локальной поверхностной закалке, является «Регулировочный винт» из стали 45. Деталь используют во всех модификациях двигателей (8 – 12 штук на двигатель). Поверхностной ТВЧ – закалке (охлаждение в масле) подвергают сферическую поверхность одного из торцов детали. Требуемый диапазон твердости — 45 - 63 единиц HRC. Существовавший на предприятии выборочный контроль твердости головки винта (2 – 3 детали от партии в 500 штук) не гарантировал необходимой твердости головок всех выпускаемых изделий (до 80000 штук в месяц). Отклонение от требуемой твердости головки винта приводило к его расплющиванию, разрушению клапана и выходу из строя всей поршневой группы.

На Минском моторном заводе проблема была решена использованием разработанного прибора «Автоматизированный сортировщик АС – 1» [1, 2] (рисунок 1).



Рисунок 1 – Прибор АС-1 в автоматном цехе филиала ММЗ в г. Столбцы

В приборе использован принцип локального воздействия переменного электромагнитного поля преобразователя трансформаторного типа лишь на головку регулировочного винта и получения информации об ее свойствах из третьей гармоники сигнала преобразователя [1, 2]. Для совмещения принципа локального воздействия на закаленную головку детали, обеспечения производительности контроля до 2 изделий в

секунду и автоматической сортировки деталей по его результатам использована роторно-конвейерная кинематическая схема прибора [2, 3]. При этом на роторном конвейере одновременно выполняется измерение электромагнитного параметра контролируемой детали, загрузка следующей детали в транспортный механизм и сбрасывание предыдущих деталей в накопители. Все процессы синхронизированы с шаговым вращением транспортного механизма. Такое построение прибора позволило проводить измерение магнитного параметра изделия в статике (в моменты остановки шагового двигателя), обеспечивая при этом высокую достоверность контроля и производительность автоматической сортировки изделий на «годные» и «бракованные».

На рисунке 2 представлена зависимость показаний прибора АС-1 от твердости HRC головок винтов, определенной стандартным методом. Коэффициент корреляции между ними составил $-0,968$, а среднеквадратичная погрешность определения твердости составила 4 единицы HRC.

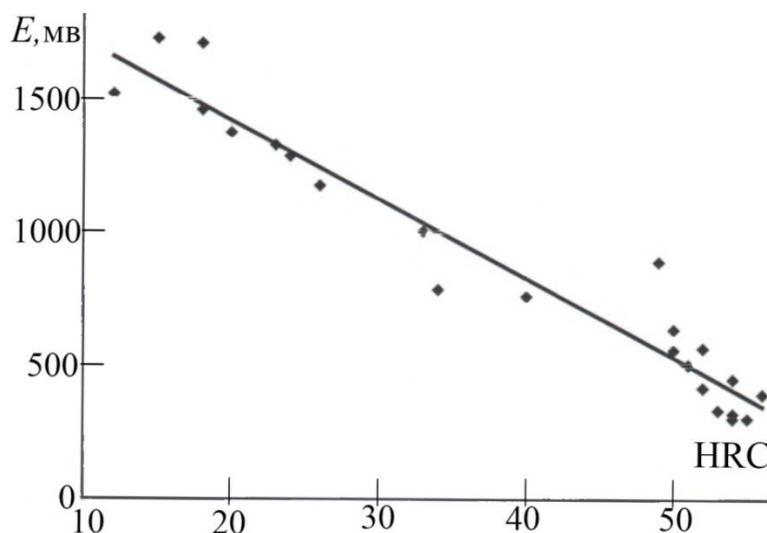


Рисунок 2 – Зависимость показаний E прибора АС-1 от твердости HRC головки винтов

Внедрение прибора и его длительная эксплуатация исключили разрушения клапана и выход из строя всей поршневой группы двигателей с последующим их дорогостоящим ремонтом, повысило надежность всех дизельных двигателей Минского моторного завода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сандомирский С.Г., Цукерман В.Л., Снякович Э.Б. Прибор-автомат для электромагнитного контроля качества ТВЧ – закалки локального участка малогабаритного изделия // Дефектоскопия. 2005. № 7. С. 61–68.
2. Сандомирский С.Г., Цукерман В.Л., Снякович Э.Б. и др. Устройство для электромагнитной сортировки малогабаритных изделий // Полезная модель Республики Беларусь № 2576.
3. Сандомирский С.Г., Снякович Э.Б. Использование последовательно-поступательного и роторно-конвейерного движения массовых партий ответственных изделий машиностроения для магнитного контроля их качества // Механика машин, механизмов и материалов. 2008. № 2. С.70–75.

УСТОЙЧИВОЕ К ОШИБКАМ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФЕКТА ФЕРРОМАГНЕТИКА

Никитин А.В., Михайлов А.В., Попов С.Э., Гобов Ю.Л.
ИФМ УрО РАН, ул. С.Ковалевской, 18
an.@imp.uran.ru

В настоящее время в дефектоскопии преобладает следующий подход к решению обратной геометрической задачи магнитостатики. Тем или иным образом исследуются значения компонент магнитных полей рассеяния над поверхностью металла, полученные в результате экспериментов, либо в результате решения прямой задачи, используя различные модели дефектов [1-2]. Затем, на основе этой информации, строятся выводы о геометрии исследуемой аномалии, вызвавшей появление магнитного поля рассеяния без непосредственного решения обратной задачи.

Другой подход состоит в восстановлении геометрии аномалии произвольной формы путем непосредственно решения обратной задачи на основе измеренных в воздухе, над металлом, значений компонент магнитного поля. К таким работам относится, например [3]. В данной работе, в линейном приближении зависимости $B(H)$, восстанавливается геометрия дефекта, по измеренному прямо над ним магнитному полю.

В настоящей работе рассматривается конфигурация, характерная для случая внутритрубной дефектоскопии, когда преобразователи магнитного поля и дефекты находятся на противоположных сторонах ферромагнитной пластины и нет способа установить магнитные преобразователи прямо над дефектом.

Ранее, в работах [4-5] показано, что геометрия дефекта в 2D и 3D случае, с учетом нелинейных магнитных свойств ферромагнетика, строится по силовой линии восстановленного поля, полученной в результате решения дифференциального уравнения, например, методом Эйлера. Однако, полученная таким способом силовая линия не устойчива к шуму во входных данных, при измерениях компонент магнитного поля.

Гораздо большую устойчивость (до 5% шума) имеет силовая линия построенная как кривая, наиболее близкая (в смысле среднеквадратичного отклонения) к углам наклона силовой линии (dZ/dX) в узлах сетки. Кроме того, данный метод позволяет использовать на первом этапе значения поля, полученные на разных слоях сетки с меньшим шумом. После нескольких итераций получаем силовую линию, устойчивую к неточностям во входных данных — силовая линия остается стабильной при внесении 5% однородного шума в значения измеренных компонент магнитного поля.

На Рис.3 изображена полученная описанным выше способом силовая линия при добавлении 3% шума к начальным данным, и вызвавший аномальные поля рассеяния дефект.

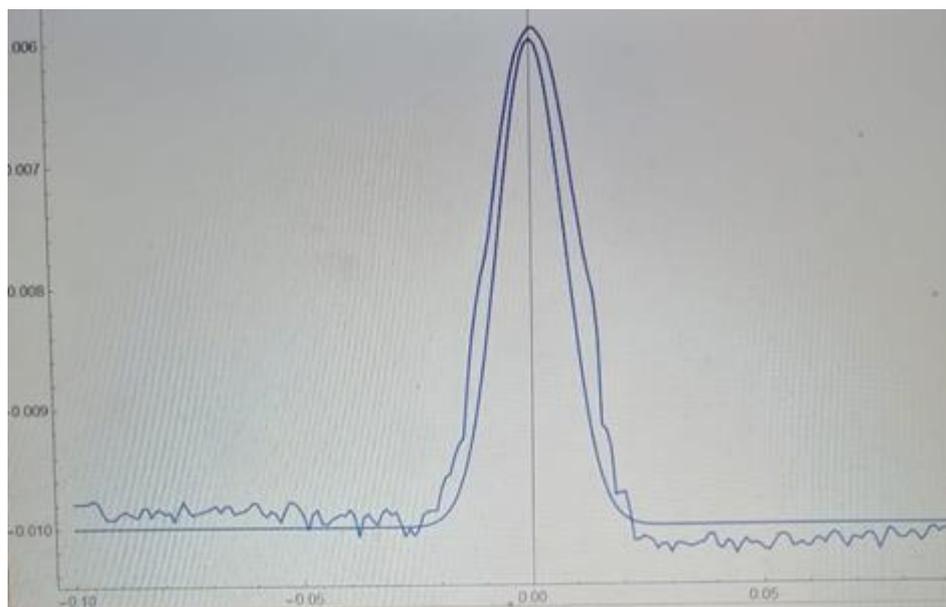


Рис. 3 Силовая линия при добавлении 3% однородного шума к измеренным значениям поля и форма дефекта.

Литература

- 1) Анализ моделей дефектов в теоретических исследованиях магнитных полей рассеяния, возникающих при намагничивании ферромагнитных объектов /Кушнер А.В., Новиков В.А. //Вестник Белорусско-Российского Университета 2014 №1(42)
- 2) К расчету магнитоэстатического поля поверхностных дефектов. 1 Топография полей моделей дефектов/Н.Н. Зацепин, В.Е. Щербинин//Дефектоскопия 1966, №5 с 50-58
- 3) Krotov, L.N., Reconstruction of a media interface from the spatial distribution of a magnetic stray field: I. Analysis of the properties of the solution of the auxiliary direct problem (linear approximation), *Russ. J. Nondestr. Test.*, 2004, vol. 40, no. 2, pp. 130–134.
- 4) Solving the Inverse Geometric Problem of Magnetostatics for Corrosion Defects / Yu. L. Gobov, A. V. Nikitin, S. E. Popov // *Russian journal of nondestructive testing*. — 2018. — V. 54. — P. 726—732.
- 5) Solving the Inverse Geometric Problem of Magnetostatics for Corrosion Defects with Allowance for Nonlinear Properties of Ferromagnet / Yu. L. Gobov, A. V. Nikitin, S. E. Popov // *Russian journal of nondestructive testing*. — 2018. — V. 54. — P. 849—854.

РАЗРАБОТКА СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ИЗДЕЛИЙ И ОБЪЕКТОВ

© 2021 г. Илона Николаевна Матвеева, Владимир Валерьянович Толмачев
УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», 620075, Екатеринбург, улица
Красноармейская 4, тел. +7 (343) 350-71-12, e-mail: Sertif@uniim.ru

Исследование напряженно-деформированного состояния (далее – НДС) является актуальной задачей при изготовлении и оценке ресурса изделий машиностроения, трубопроводов, сосудов и конструкций различного назначения и их элементов.

Анализ реестра утвержденных типов средств измерений показал, что по состоянию на 2020 год имеются средства измерений утвержденного типа, реализующие следующие методы контроля НДС – акустический, электрический, магнитный и др.

Средства измерений (далее – СИ), реализующие акустический метод контроля НДС, внесены в реестр как средства измерений механических напряжений. Однако в связи с отсутствием эталона механических напряжений для этих СИ не обеспечена метрологическая прослеживаемость к единице механических напряжений.

УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им.Д.И.Менделеева» проведены испытания с целью утверждения типа набора стандартных образцов механических свойств сталей (набор ИНКО МСС-МН 1) – ГСО 11544-2020/ГСО 11545-2020.

Метрологические характеристики набора представлены в табл. 1.

Таблица 1

Метрологические характеристики ГСО 11544-2020 / ГСО 11545-2020

Аттестованная характеристика	Обозначение единицы величины	Интервал аттестованных значений	Границы допускаемых значений абсолютной погрешности аттестованного значения при доверительной вероятности 0,95, ($\pm \Delta$)
Напряжение $\sigma_{пл}$, предел пропорциональности *	МПа (Н/мм ²)	(100-130) / (480-830)	± 12 / ± 22
Напряжение $\sigma_{0,2}$, предел текучести условный с допуском на величину пластической деформации 0,2 % *	МПа (Н/мм ²)	(160-200) / (600-1020)	± 12 / ± 22
Напряжение σ_b , предел прочности (временное сопротивление) *	МПа (Н/мм ²)	(300-320) / (700-1200)	± 12 / ± 22
Приращение напряжения при приращении относительного удлинения 1 % (модуль упругости) E *	МПа (Н/мм ²)	(950-2000) / (1650-2000)	± 90 / ± 50

* Наименования аттестованных характеристик соответствуют ГОСТ 1497-84

Отличительной особенностью разработанных стандартных образцов является

аттестация по характеристикам «Напряжение $\sigma_{пл}$, предел пропорциональности», «Приращение напряжения при приращении относительного удлинения 1 % (модуль упругости) E ». Аттестованные значения этих характеристик позволяют более точно задавать область упругой деформации при установлении коэффициентов упруго-акустической связи по ГОСТ Р 55043-2012.

Набор представляет собой образцы специальной конструкции, обеспечивающей возможность установки в захватах разрывных и универсальных испытательных машин.

Исходным материалом для изготовления стандартных образцов набора являлись лист проката из конструкционной стали, поковка из высококачественной конструкционной высоколегированной стали.

В связи с тем, что при реализации акустического метода контроля НДС важной характеристикой является величина собственной акустической анизотропии материала, исходный материал был исследован по показателю собственной акустической анизотропии по методике ГОСТ Р 52731-2007. Исходный материал был признан изотропным.

Установление аттестованных значений и оценивание погрешности аттестованных значений СО проведены в соответствии с алгоритмами и положениями РМГ 53-2002. При расчете погрешностей аттестованных значений учтены результаты оценивания однородности. Оценивание однородности проведено в соответствии с РМГ 53-2002.

Срок годности экземпляров СО набора установлен на основании данных о сроках годности аналогичных СО механических свойств сталей (ГСО 10957-2017). Срок годности экземпляров СО набора – 10 лет.

Прослеживаемость аттестованных значений к единице величины реализуется посредством прямых измерений на Государственном эталоне единицы силы 1 разряда в соответствии с Государственной поверочной схемой для средств измерений силы, Государственной поверочной схемой для средств измерений длины в диапазоне от $1 \cdot 10^{-9}$ до 100 м и длин волн в диапазоне от 0,2 до 50 мкм.

Разработка и применение ГСО 11544-2020/ГСО 11545-2020 механических свойств сталей позволяет проводить испытания в целях утверждения типа средств измерений механических напряжений, использующих метод акустоупругости; проводить поверку и калибровку средств измерений механических напряжений, использующих метод акустоупругости; проводить контроль точности результатов измерений механических напряжений.

Для применения ГСО 11544-2020/ГСО 11545-2020 при измерении НДС акустическим, электрическим, магнитным и другими методами необходима разработка и аттестация соответствующих методик измерений.

ПРИМЕНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕНИЙ В РЕЛЬСАХ ТЕКУЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ АНАЛИЗА ИХ ВЛИЯНИЯ НА НАРАБОТКУ РЕЛЬСА

© 2021 г. Кирилл Александрович Тапков^{1*}, В.В. Муравьев^{1**}
¹ – *Ижевский государственный технический университет имени М.Т.
Калашникова,*

¹ – *г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7.*

* - *e-mail1; izhjup@mail.ru; +7(3412)776055 доб. 1132***- *e-mail2; pmkk@istu.ru*

Весомую роль в безопасности эксплуатации железнодорожного пути играет надёжность рельсов. [1]. Согласно [2] наибольшую опасность и частоту возникновения имеют усталостные дефекты в головке рельса, возникающие при длительной эксплуатации рельса. Цель данной работы заключалась в исследовании роста усталостной трещины в головке рельса до отнесения рельса в острodefектную категорию (дефект 21.2) в зависимости от уровня экспериментально исследованных напряжений. Переход в острodefектную категорию, согласно НТЦ/ЦП-2-93, осуществляется при пересечении усталостной трещиной оси симметрии рельса, либо выходе трещины на поверхность.

Моделирование проводилось в программной среде Comsol Multiphysics. Расчёт уровня остаточных технологических напряжений по элементам был проведён в [3]: минус 78 МПа в головке рельса, минус 125 МПа в шейке рельса, 107 МПа в подошве рельса. Вертикальная составляющая нагрузки со стороны подвижного состава составляет 114 кН, боковая нагрузка на рельс составляет 66 кН, пятно контакта имеет площадь 95 мм² [4]. Количество шпал 2000 шт/км, общая жёсткость пути составляет 80 МПа [5]. Также при эксплуатации возможно появление термических напряжений, описанных в [6].

Инструментальная оценка напряжений проводилась с использованием установки СЭМА, разработанной в ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, и внесённой в реестр средств измерений (госреестр № 61957-15)

В качестве критерия разрушения использовалась кривая Веллера, характеристики стали регламентированы ГОСТ 51685-2013 (предел прочности $\sigma_b=1180$ МПа, предел текучести $\sigma_{0,2}=800$ МПа, предел выносливости $\sigma_{-1}=370$ МПа).

Результаты моделирования перехода рельса в острodefектную категорию в зависимости от уровня напряжений представлены в табл. 1

Таблица 1

Наработка рельса в зависимости от напряжений в головке рельса

Напряжения в головке, МПа	-40	-80	-120
Наработка, млн. тонн брутто	2011	1883	1709

Результаты моделирования перехода рельса в остродефектную категорию в зависимости от разницы между фактической температурой и температурой закрепления представлены в табл. 2.

Таблица 2

Наработка рельса в зависимости от термических напряжений в рельсовом пути

Разница между фактической температурой, и температурой закрепления рельса ΔT , °С	-50	-25	0	+25	+50
Уровень напряжений в головке рельса, МПа	44	-13	-80	-141	-299
Наработка, млн. тонн брутто	2243	2080	1883	1592	1274

Выводы. 1. Термические напряжения, возникающие в рельсах, могут оказывать более значительное влияние на возникновение и рост усталостного дефекта в головке рельса, чем изменение уровня остаточных технологических напряжений на 50%.

2. При условии эксплуатации рельса в течение большей части времени при перепаде температур не выше +25 усиленный контроль на наличие дефектов в виде трещин в головке рельса необходимо проводить после наработки 1500 млн. тонн брутто.

3. Выявленные зависимости перехода рельса в остродефектную категорию как от остаточных технологических, так и от термических напряжений, носят линейный характер.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хлыст С.В., Кузьмиченко В.М., Резанов В.А., Борц А.И., Шур Е.А. Перспективная технология производства рельсов для высокоскоростного и тяжеловесного движения//Вестник ВНИИЖТ – 2013, №6 – С.14-20.

2. Шур Е.А., Борц А.И., Сухов А.В., Абдурашитов А.Ю., Базанова Л.В., Заграничек К.Л. Эволюция повреждаемости рельсов с дефектами контактной усталости//Вестник ВНИИЖТ – 2015, №3 – С. 3-9.

3. Muravev V.V., Tapkov K.A., Volkova L.V., Platunov A.V.. Strain Stress Model of the Rail with Crack in its Head and Estimation of its Operational Lifetime//Materials Science Forum, Vol. 970 – 2019, pp 177-186.

4. 123. Воробьев А.А. Сорокин П.Г. Исследование напряжённого состояния пятна контакта колеса и рельса//Новые материалы и технологии в машиностроении – 2004, №3 – С. 8-18.

5. Бондаренко И. А. Методика расчета характеристик стабилизирующего слоя / И. А. Бондаренко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. - 2007. - Вип. 14. - С. 76-80.

6. Муравьев В.В., Волкова Л.В., Громов В.Е., Глезер А.М. Оценка остаточных напряжений в рельсах с использованием электромагнитно-акустического способа ввода-приема волн // Деформация и разрушение материалов - 2015. № 12 - С. 34–37.

О ПЕРСПЕКТИВАХ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ УПРУГОЙ И ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

© 2021 г. Лидия Александровна Трибушевская, Владимир Валерьянович Толмачев
УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», 620075, Екатеринбург, улица
Красноармейская 4, тел. +7 (343) 355-45-25, e-mail: form233@uniim.ru

Поле напряжений и механическая деформация - изменение размеров и формы физических тел, вызванное изменением взаимного положения частиц тела и перемещением друг относительно друга, тесно связаны.

Для определения внутренних напряжений и механических характеристик путем измерения деформаций используют, во-первых, методы испытаний материалов на прочность с применением рентгеновских методов, электрохимических исследований или на основе применения тензометров, экстензометров (контактные, оптические), во-вторых, экспериментальный анализ прочностных свойств элементов конструкций, основанных на применении метода делительных сеток, натурной тензометрии, применении волоконно-оптических датчиков, метода оптических покрытий и др.

Экспериментальный анализ прочностных свойств элементов конструкций позволяет определять значения внутренних напряжений, возникающих в деталях и конструкциях, изготовленных из различных материалов, позволяя с применением методов расчета прочностных характеристик оценивать надежность и долговечность работы деталей и узлов машин, конструкций и сооружений. Актуально в химическом машиностроении, атомной промышленности при создании новых образцов сосудов и аппаратов, в которых учитывается работа узлов и деталей за пределом упругости, т.к. при создании новых образцов изделий нередко необходимо измерить напряжение в местах, трудно поддающихся расчету, а в жестких условиях эксплуатации важно иметь надежные численные значения предела выносливости при циклическом нагружении, когда уровень деформации достигает 3 %, в том числе при применении изделий из сплавов с высоким значением предела текучести, а также специальных материалов, область упругого деформирования которых достигает нескольких процентов

Для средств измерений деформации, применяемых для экспериментального анализа прочностных свойств можно выделить основные требования: чувствительность измерителя деформации должна оставаться постоянной как в упругой, так и в пластической области; измеритель деформации должен иметь достаточно малые габариты во всех направлениях, так как в зоне концентратора наблюдается высокий градиент деформаций продольной и поперечной; инфраструктура должна позволять монтаж и измерения в труднодоступных местах.

В настоящее время в федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений представлены более 30 типов первичных преобразователей деформации, применяемые для их поверки Установки с балками нагружаемые по схеме чистого изгиба имеют диапазон воспроизведения деформации не более 5000 мкм^{-1} , так как передача единицы возможна только в зоне упругих деформаций. Таким образом передача единицы деформации средствам измерений – тензорезисторам, волоконно-оптическим датчикам в диапазоне измерений деформации свыше 5000 мкм^{-1} является на сегодня - актуальной задачей. Одним из вариантов ее решения является использование средств сравнения (стандартных образцов категории ГСО). Стандартные образцы позволят воспроизводить деформацию и в пластической области, но использоваться могут только однократно. Такой подход предъявляет особые требования к характеристикам как партии, так и каждого образца не только в части геометрических параметров, но и механических свойств, для определения которых необходимо использовать неразрушающие методы. Один из рассматриваемых вариантов определения модуля упругости и его однородности в рабочей зоне образца – применение экстензометров полного поля. Они позволяют получить данные не только о деформации тела, но и имеющихся градиентах, что позволит анализировать не только свойства, обусловленные непосредственно самим образцом, но и оценить корректность нагружения при характеристике - наличия изгибающих и скручивающих моментов. Такие экстензометры не имеют достаточного метрологического обеспечения в нашей стране, но положения калибровки оптических систем для измерений деформации рассматриваются в проекте RTD с Европейской Комиссией по конкурентоспособному и устойчивому росту, в котором принимали участие одиннадцать партнеров из семи различных стран. Проект содержит основные положения калибровки оптических систем для измерений деформации на основе которых планируется создание стандартов, оптимизированных методик; физических и виртуальных эталонных материалов; и рекомендуемых схем прослеживаемости.

Создание средства сравнения в статусе ГСО позволит решать следующие задачи: передача единицы в области больших деформаций первичным преобразователям, таким как тензорезисторы, волоконно-оптические датчики деформации; калибровка машин испытательных в части определение изгиба и скручивания, возникающего при растяжении и сжатия в ходе испытаний на растяжение по методикам, аналогичным ASTM E1012-19; метрологическое обеспечение обратной задачи (дополненной реальности): по полю деформации восстановить поле механических напряжений в изделии, идентифицировать момент перехода напряжений в материале изделия из зоны упругости в зону текучести и предсказать вероятность разрушения изделия.

МЕТОД АКУСТИЧЕСКОЙ ТЕНЗОМЕТРИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГОЛОВНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ

© 2020 г. Алифанова Ирина Евгеньевна^{1*}, А.В. Фёдоров^{1**}, В.А. Быченко^{2***},
И.В. Беркутов^{2****}

¹ – Университет ИТМО, 197101 Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

² – ООО НТЦ «Эталон», 197343 Санкт-Петербург, ул. Матроса Железняка, 57

* - sherbairina@mail.ru; ** - afedor62@yandex.ru; *** - bychenok-vladimr@mail.ru;

**** - chigivara56712@mail.ru

В данной работе рассмотрен метод акустической тензометрии, при котором информационным параметром для контроля механических напряжений (МН) является скорость распространения головной ультразвуковой волны (УЗВ). Для определения МН используется определение и регистрация относительного изменения значения скорости распространения головной УЗВ с поправкой на изменение измеряемого значения, вызванного изменением температуры объекта контроля. Изменение скорости распространения головной УЗВ прямо пропорционально изменению величин МН, возникающих в материале при приложении к нему усилий. Измерение скорости распространения головной УЗВ производится с помощью оптико-акустического раздельно-совмещенного преобразователя (ОАП). Расчет МН производится по формуле [1]:

$$\sigma = K_v \frac{K_T(T - T_0) + v - v_0}{v_0} \quad (1)$$

где v_0 – скорость распространения головной УЗВ в материале объекта контроля в ненапряженном состоянии ($\sigma = 0$), измеренная при температуре T_0 ;

v – скорость распространения головной УЗВ в материале объекта контроля в напряженном состоянии ($\sigma \neq 0$), измеренная при температуре T ;

K_v – коэффициент упругоакустической связи (КУАС) – связи между акустическими параметрами и механическими напряжениями [2];

K_T – коэффициент термоакустической связи (КТС) – связи между акустическими параметрами и температурой окружающей среды, объекта контроля и ОАП.

На рисунке 1 приведена расширенная диаграмма Исикавы, которая позволяет представить факторы, формирующие неопределенность измерения МН и устанавливает причинно-следственные связи между ними. В ее структуру входят причинно-следственные диаграммы, описывающие источники неопределенности для скорости распространения головной УЗВ, коэффициентов КУАС и КТС.



Рисунок 1 – Расширенная диаграмма Исикавы вкладов в неопределенность измерений МН

На основе [1] была разработана методика оценки неопределенности измерений МН ультразвуковым методом с помощью ОАП. Был оценен вклад результатов измерений скорости распространения головной УЗВ, температуры объекта контроля и ОАП, коэффициентов КУАС и КТС в неопределенность измерений МН.

Была получена зависимость расширенной неопределенности измерений от величины измеряемых МН, из которой следует, что измерения МН в диапазоне менее 100 МПа обладают неопределенностью более 10 % от измеряемой величины. При измерении МН более 200 МПа неопределенность измерений не превысит 4 % (при уровне доверительной вероятности 95 %).

Предложенный подход к оценке неопределенности измерений МН может быть полезен при разработке требований к используемым средствам измерений, настроечным образцам и объектам контроля, а также при разработке методик контроля МН ультразвуковым методом с использованием ОАП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быченко В.А., Беркутов И.В., Майоров А.Л., Ильин А.В., Кириенко В.В., Прохорович В.Е., Чекмарева М.А. Контроль остаточных напряжений в околошовной зоне сварного шва // В мире неразрушающего контроля -2018. - Т. 21. - № 4. - С. 50-53
2. ГОСТ Р 55043-2012 Контроль неразрушающий. Определение коэффициентов упругоакустической связи. Общие требования.
3. ГОСТ 34100.3-2017 Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ КОМПТОНОВСКОГО ГАММА-ИНТРОСКОПА

© 2021 г. Евгения Александровна Купчинская^{1*}, О. В. Игнатъев¹, А. В. Купчинский¹
¹ – *Уральский федеральный университет, 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 21*
* - *e.a.kupchinskaya@urfu.ru +7 (950) 65 60 164*

Исследуемый γ -интроскоп предназначен для поиска субмиллиметровых дефектов в массивных металлических изделиях ($Z \geq 80$, толщина порядка 100 мм). Особенностью реализованного в нем способа визуализации [1] является режекция γ -квантов, рассеянных в объекте контроля. Это позволяет принципиально улучшить изображение по сравнению с традиционными способами.

Режекция рассеянных γ -квантов обеспечивается за счет отбора событий по энергии (исследуемое изделие облучается источником ^{60}Co). Ключевой, сцинтилляционный позиционно-чувствительный детектор (детектор-рассеиватель) установки измеряет как точку попадания гамма-квантов так и их энергию.

Детектор-рассеиватель сконструирован на основе протяженного кристалла $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ в виде цилиндра с высотой 5 мм и диаметром 55 мм. Сигнал регистрируется матрицей фотосенсоров 8×8 , каждый размером 6×6 мм. Для каждой сцинтилляционной вспышки по данным матрицы вычисляется положение этой вспышки.

Созданная установка [2] характеризуется пространственным разрешением 400 ± 100 мкм. Целью исследования стало изучение возможностей улучшения разрешения в рамках уже сконструированной установки, а также определение предельного значения, которое может быть получено при конструировании следующей.

Для поиска и определения факторов, наиболее влияющих на пространственное разрешение, была построена модель детектора с использованием пакета GEANT4. Пространственное разрешение в компьютерной модели интроскопа составило 500 мкм в центре поля зрения. Для корректного определения координат точки взаимодействия в сцинтилляторе было исследовано несколько алгоритмов восстановления координат, из которых был выбран наилучший (по линейности координат и пространственному разрешению), использовавшийся в дальнейших расчетах.

Результаты исследования для различных параметров сцинтиллятора приведены в табл. 1. Разрешение измерялось в центре поля зрения интроскопа ($\varnothing 40$ мм).

**Предельное улучшение пространственного разрешения при изменении параметров
сцинтиллятора**

Параметр сцинтиллятора	Возможные изменения	Улучшение пространственного разрешения, %
толщина	уменьшение толщины до 1 мм и менее	50
диаметр	увеличение диаметра до 60 мм	2 (в центре изображения) 10 (на расстоянии 20 мм от центра изображения)
форма	замена цилиндрического сцинтиллятора на квадратный той же толщины	2
световыход	увеличение световыхода до 120 фотонов/кэВ	27

Изменение параметров сцинтиллятора оказывает наибольшее влияние на пространственное разрешение детектора. Помимо указанных факторов были исследованы влияния параметров фотосенсоров (главным образом размер и величина зазора между фотосенсорами, поскольку эффективность регистрации рассматривалась в совокупности со световыходом сцинтиллятора), непараллельности исходного пучка, выбора алгоритма расчета координат. Все указанные факторы при изменении в максимальных пределах дают улучшение пространственного разрешения в пределах 3%, то есть не оказывают существенного влияния.

По результатам исследования оказалось, что пространственное разрешение детектора γ -интроскопа может быть наиболее эффективно улучшено (до 200-250 мкм) за счет уменьшения толщины сцинтиллятора. Однако при этом более чем в 5 раз уменьшается эффективность регистрации. Также пространственное разрешение может быть улучшено за счет увеличения числа регистрируемых фотонов (главным образом за счет использования сцинтиллятора с большим световыходом). Прочие пути улучшения пространственного разрешения не являются эффективными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РФ 2680849, G01T 1/36. Способ гамма-радиографической интроскопии / *Игнатъев О.В., Горбунов М.А., Морозов С.Г., Купчинская Е.А., Купчинский А.В., Пулин А.А., Дудин С.В., Фофанов Д.А.* Оpubл. 28.02.2019. Бюл. № 7. 2 с.
2. *Горбунов М.А., Дудин С.В., Игнатъев О.В., Купчинская Е.А., Купчинский А.В., Морозов С.Г., Пулин А.А.* Новый способ и установка высокоразрешающей γ -радиографической интроскопии массивных изделий и заготовок из тяжелых металлов. Первые результаты применения // Дефектоскопия. 2019. № 10. С. 50—60.

ПРЕИМУЩЕСТВА НОВОГО ИНДИКАТОРА ДЕФЕКТОВ МЕТАЛЛА

© 2021 г. Суторихин Владимир. Анатольевич

ООО «Дистанционные Индикаторы Активных Дефектов» 634001, г. Томск, ул. Лебедева 11.

winddiad1@yandex.ru, тел: 8-913-824-40-39

Новый принцип неразрушающего контроля металлов, сочетающий известные активные и пассивные ультразвуковые методы получения полезных сигналов, стал возможным благодаря разработке индикатора активных дефектов на основе совместного использования генератора ультразвука и радара Доплера. Впервые использовано свойство механического давления ультразвука на металл. В результате стало возможным отказаться от механического нагружения при сохранении высокой надежности, без необходимости длительных процессов испытаний, присущих акустико-эмиссионному методу.

Постановка задачи

Как известно, простые методы активной ультразвуковой передачи обладают низкой надежностью из-за сложности распознавания различных вариантов сигналов, полученных при многократном отражении зондирующих импульсов. Особенно из-за небольших размеры предполагаемых дефектов. В то время как высокая надежность обнаружения дефектов по пассивному методу, обусловленная естественным возникновением самих эмиссионных сигналов разрушения структуры металлического объекта, не имеет себе равных по надежности обнаружения микродефектов. Но в то же время возникает неудобство эксплуатации, обусловленное необходимостью ограничения внешнего шума, требованием вывести объект из рабочего режима, что ограничивает его использование. Оба способа связаны с необходимостью использования контактных датчиков, требующих применения иммерсионных жидкостей, очищения места установки датчиков для надежной работы.

Вариант решения

Решение задачи повышения надежности испытаний и снижения (вплоть до исключения) дополнительной механической нагрузки стало возможным благодаря сочетанию обоих методов. Это казалось невозможным до тех пор, пока не было использовано свойство механического давления ультразвука на электронный газ (вырожденный) металла. Это свойство впервые было описано профессором астрофизика

Васильевым Б. В. в виде гипотезы [1] в конце прошлого века. Другой русский профессор В. И. Горбунов. (ведущий специалист НИИ дефектоскопии) провел испытания, в которых показал, что механическое давление на определенную область вырожденного электронного газа металлов возможно с помощью маломощного ультразвука при одновременном измерении поверхностной проводимости бесконтактным датчиком-доплеровским радаром [2,3], впервые обозначенным как дистанционный индикатор активных дефектов (ДИАД).

Примеры практического использования

Практическое использование прибора показало, что время определения дефектов в металле (на поверхности и в глубине до 2 метров) составляет 2-3 секунды. Индицирование проводится без остановки технологических процессов (движение ЖД составов, вращение валов турбин, насосов), что было весьма затруднительно прежде. Исследованы дефекты наводораживания металла паропроводов без сложных процессов термического «выпаривания» водорода после прекращения технологических процессов. Установлена возможность определения местоположения дефектов. По мнению зарубежных специалистов (профессор Крёнинг Х.-М.В.), при серийном производстве стоимость прибора может быть не более 5 тысяч долларов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев Б. В., Любошиц В. Л. Теорема вириала и некоторые свойства электронного газа В. Л. в металлах //Успехи физических наук, 4, (164), 1994, С. 367-374.
2. Горбунов В. И., Суторихин В. А. Применение дистанционного СВЧ-преобразователя акустической эмиссии для контроля качества сварных соединений / / Заводская лаборатория.- Диагностика материалов. № 10. том 65, 1999, с. 36-38
3. Горбунов В. И., Суторихин В. А., Возможность дефектоскопии металлических деталей СВЧ-полем//Техническая акустика, Т. 10. 2010, с. 16.

ДИАГНОСТИКА ТРУБОПРОВОДОВ ИНДЕНТИРОВАНИЕМ¹

© 2020 г. М.М. Матлин*, Владимир Андреевич Казанкин**, Е.Н. Казанкина***

*Волгоградский государственный технический университет,
400005, г. Волгоград, пр-кт им. В.И. Ленина, д. 28*

* – *matlin@vstu.ru*; ** – *kazankin_vmr@mail.ru*; *** – *kazankina_elen@mail.ru*

Цель настоящей работы состоит в оперативной оценке металла после длительной эксплуатации, в частности, материала трубопроводов. Такая оценка необходима для обеспечения прочности и техногенной безопасности металлоизделий.

Проблема состоит в том, что многие технические объекты находятся в эксплуатации длительное время (например, ряд магистральных трубопроводов работает более 50 лет [1]). При возможном экстремальном нагружении трубопровода напряжения, возникающие в материале труб, приближаются к пределу текучести. Это создает условия для деформационного старения материала, следствием которого является охрупчивание металла [2].

Для определения прочности материала в местах выхода на поверхность опасных сечений и в местах концентрации напряжений широкое распространение получили неразрушающие методы определения прочностных свойств по результатам индентирования [3, 4]. В работе [3] при исследовании металла в процессе длительной эксплуатации показано, что характеристикой степени охрупчивания металла может служить отношение условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ к временному сопротивлению σ_B . Чем ближе это отношение к единице, тем больше вероятность перехода металла из вязкого состояния в хрупкое. Поэтому отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ можно использовать для оценки и прогнозирования степени деградации металла стареющего оборудования.

В работе [5] для определения остаточного ресурса металла трубопроводов предложена методика определения отношения $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ в зависимости от уровня пластической деформации, величина которой определяется путем испытания образцов, вырезанных из трубопровода. В работе [6] предложен неразрушающий метод определения отношения $\sigma_{0,2}/\sigma_B$, который базируются на закономерностях первоначально точечного упругопластического контакта детали и сферического индентора, а их отношение определяется в зависимости от пластической твердости НД

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00049, и при поддержке РФФИ и Волгоградской области в рамках научного проекта № 19-48-340002, а также в рамках конкурса МК-2021 (грант Президента РФ № МК-84.2021.4)

[7] по формуле

$$\sigma_{0,2}/\sigma_B = (2,2 \cdot 10^{-5} \cdot \text{НД})^{245/\text{НД}}. \quad (1)$$

Экспериментальная проверка формулы (1) выполнена на сталях различного уровня прочности: погрешность определения отношения $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ не превышает, как правило, 5% (по сравнению с испытанием образцов на растяжение с помощью программно-технического комплекса для испытания металлов ИР 5143–200) и имеет характер двустороннего разброса.

Для практического использования описанной методики в процессе мониторинга состояния материала трубопроводов можно использовать портативные переносные твердомеры статического или ударного действия, подробный обзор которых приведен в работе [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бурнашев А.В., Большаков А.М.* Исследование ударной вязкости сталей магистрального трубопровода после 50-летней эксплуатации в условия крайнего севера // V11 Международная научная конференция "Проблемы механики современных машин". Улан-Уде. 2018. С. 156-160.
2. *Кузьбожев А.С., Агинец Р.В., Смирнов О.В.* Применение электронной микроскопии в исследованиях деформационного старения материала трубопроводов Заводская лаборатория // Диагностика материалов. 2007. Т. 73. №10. С. 37-41.
3. *Матюнин В.М.* Индентирование в диагностике механических свойств материалов. - М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 288 с.
4. *Белослудцев Т.Н., Котоломов А.Ю., Ковех В.М., Овсянников Е.Н., Чернышов А.В.* Оценка механических свойств основного металла и металла сварных соединений трубопроводов неразрушающим (безобразцовым) методом по измерению твердости // Территория "Нефтегаз". 2014. № 8. С. 36-40.
5. Патент 2221231 Российская Федерация, МКИ G01 N 3/00 Способ определения остаточного ресурса металла магистрального трубопровода / *Б.В. Будзуляк, В.В. Кудрявцев и др.* Оpubл. 10.01.04. Бюл № 1.
6. *Матлин М.М., Мозгунова А.И., Казанкина Е.Н., Казанкин В.А.* Методы неразрушающего контроля прочностных свойств деталей машин. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 247 с.
7. ГОСТ 18835-73. Металлы. Метод измерения пластической твердости. – Введ. 01.01.74 (ограничение срока действия снято Межгосударственным Советом стандартизации, метрологии и сертификации, протокол №3-93, ИУС №5/6, 1993 г.).
8. *Матлин М.М., Казанкин В.А., Казанкина Е.Н., Костюков В.А.* Контроль твердости крупногабаритных металлоизделий (обзор публикаций) // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2020. № 10. С. 30-33.

ПРИМЕНЕНИЕ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСЛОВИЙ МАКСИМАЛЬНОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СМЕННЫХ РЕЖУЩИХ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПЛАСТИН ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ

© 2021 г. Е. В. Артамонов¹, Д. В. Васильев¹, Владислав Вадимович Воронин^{1*}
¹ – Тюменский индустриальный университет, 625000 г. Тюмень, ул. Володарского, 38
* - vladislavalbus@gmail.com, 8-912-395-75-57

ВВЕДЕНИЕ

Методы неразрушающего контроля (НК) получили широкое распространение в современной промышленности, благодаря возможности получать с их помощью необходимый спектр диагностических данных без нарушения целостности изделия или прерывания технологического процесса. Подавляющее большинство методов НК основаны на косвенных измерениях, то есть используют однозначные корреляции физических величин, полученные в результате теоретико-экспериментальных исследований. Существенным преимуществом некоторых видов НК является достаточно быстрое получение диагностических данных об исследуемом объекте. Однако, говоря о вибродиагностическом методе НК, следует обратить внимание на его способность предсказывать некоторые виды дефектов, что наиболее применимо при контроле подшипниковых узлов. Данный метод НК основан на использовании широкой эмпирической базы данных характерных спектров, параметры которых указывают на известный вид дефекта. Спектральный анализ – неотъемлемая часть вибродиагностики, которая несет главную информационную нагрузку.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель работы. Показать возможность применения вибродиагностики в качестве методологической основы системы определения максимальной работоспособности сменных режущих твердосплавных пластин.

Авторами выдвинуто научное предположение, что из спектра вибрации токарного станка можно выделить не только привычные диагностические данные об узлах вращения, но и характерные частоты, указывающие на вид стружки, выходящей в момент наблюдения из-под режущего инструмента. Оперативные данные, полученные в результате такого анализа, решают задачу обеспечения условий максимальной работоспособности режущего инструмента в паре с материалом заготовки непосредственно в процессе обработки. Применение математического и прикладного аппарата вибродиагностики может стать основой метода автоматизированной корректировки режимов резания в системах с ЧПУ или модернизированных токарных станках общего назначения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В задаче определения в реальном времени оптимальных параметров процесса токарной обработки металлов резанием по спектру вибрации режущего инструмента важным этапом является накопление некоторой базы данных по характерным частотам сегментообразования суставчатой стружки. В работах [1], [2] показано, что интерес представляет переход вида стружки из сливной в суставчатую, поскольку в этот момент изменяется характер нагрузки на режущий инструмент. При сходе сливной стружки вертикальная составляющая силы резания P_z имеет достаточно стабильный характер, суставчатая стружка, напротив, воздействует на резец периодически, вызывая колебания в определенном диапазоне частот. Получение необходимых данных заключается в поиске такой скорости резания, при которой вид стружки изменяется из сливной в суставчатую, при этом записывается временной сигнал виброускорения и собирается стружка. Определение частоты сегментообразования производится по их шагу, измеренному непосредственно с помощью микроскопа.

Экспериментальные исследования показали качественное изменение спектра вертикальной составляющей виброускорения державки режущего инструмента, пики были обнаружены в ожидаемом диапазоне частот сегментообразования, рассчитанном по шагу сегмента исследуемой стружки. Данные получены для сплавов 1Х18Н9Т, 14Х17Н2, 12Х2НВФА, 10Х11Н23ТЗМР-ВД.

Отслеживание в автоматическом режиме качественного состава спектра виброускорения в заданных диапазонах частот может использоваться при мгновенном контроле условий резания при токарной обработке жаропрочных сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артамонов Е.В., Васильев Д.В., Утешев М.Х. Формирование условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов путем высокотемпературного охрупчивания при резании. // СТИН 2016. № 9. С. 21—24.
2. Артамонов Е.В. Прочность и работоспособность сменных твердосплавных пластин сборных режущих инструментов. Тюмень: ТюмГНГУ, 2003. 192 с
3. Розенберг Г.Ш., Мадорский Е.З. Вибродиагностика. Санкт-Петербург: ПЭИПК, 2003. 284 с.
4. Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 448 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ПРОЕКЦИОННОГО МУАРОВОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТА

© 2021 г. Ульяна Викторовна Лаптева^{1*}, О. Н. Кузяков^{1**}

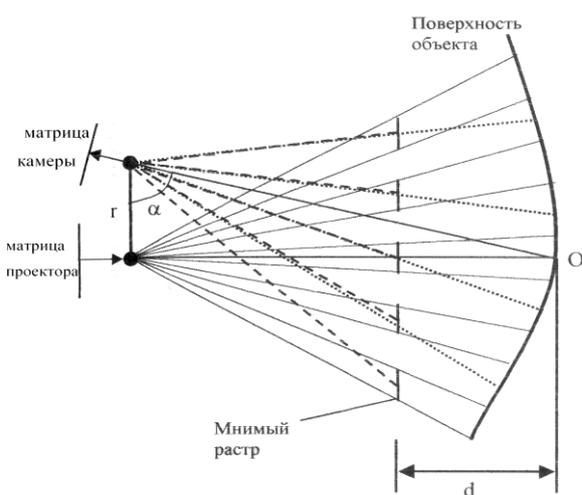
¹ – ФГБОУ ВО Тюменский индустриальный университет, 625000 г. Тюмень, ул. Мельникайте, 70

* - e-mail1 laptevauv@tyuiu.ru; ** - e-mail2 kuzjakovon@tyuiu.ru;

Цель работы. Исследование электронно – проекционного метода, моделирующего муаровый эффект, для выявления эффективных параметров метода и оптимальной конфигурации устройства реализации метода.

Суть обсуждаемой проблемы. В настоящее время по-прежнему остаётся актуальной задача мониторинга состояния поверхности объекта нефтегазовой, трубопроводной, строительной или другой сферы деятельности, включая медицинскую. Для её решения применяются различные технологии, методы и способы. Часть методов основана на применении муарового эффекта. Известен электронно-проекционный способ моделирования муарового эффекта для определения деформаций. Требуется обосновать принципы оптимальной конфигурации устройства реализации электронно-проекционного метода исследования деформаций и алгоритмизовать процесс исследования деформаций с применением электронно-проекционного метода, а также создать информационно – измерительную систему, предназначенного для исследования и принятия решения о характере деформаций с достаточной степенью точности в условиях неопределённости.

Полученные результаты и выводы. Оптическая схема, поясняющая электронно-проекционный муаровый метод, представлена на рис. 1. Математическая модель



получения муаровой картины описывается следующим образом:

1) Угол β - угол между оптическими осями проектора и камеры

2) Координаты центров муаровых полос



Рис. 1 Схема получения муаровой картины

3) Значения высот деформаций

$$\sqrt{L}$$

Используя выражения для угла наклона муаровых полос к оси абсцисс, определения отрезка, отсекаемого муаровой полосой от оси ординат, для вычисления расстояния муаровой полосы от начала координат, а также выражение для определения шага муаровых полос при реализации электронно-проекционного метода, моделирующего муаровый эффект, исследуются электронно – проекционный метод. В результате даются рекомендации по подбору оптимальных параметров метода исследования топологии поверхности. Сформулированы принципы оптимальной конфигурации устройства реализации электронно-проекционного метода и предложен алгоритм принятия решения о характере деформаций на основе правил нечёткого логического вывода (см. рис. 2).

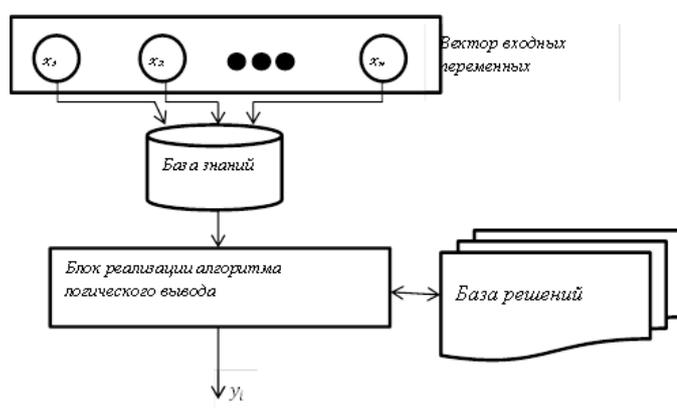


Рис. 2 Обобщённая схема алгоритма оценки состояния поверхности объекта

Дальнейшее развитие работы предполагает разработку нейронной сети, база знаний которой реализуется на основе правил нечёткого логического вывода. Данная система позволит как минимум человеческий экспертный фактор в принятии решения о характере деформаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузяков О.Н., Дубатовка У.В. Использование метода, моделирующего муаровый эффект, для системы контроля деформаций, Вестник кибернетики. – Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2003. – Вып. 2. – С. 183-189.
2. Кузяков О.Н., Андреева М.А., Лантева У.В. Разработка системы для определения топологии поверхности технологического объекта Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2017. № 5. С. 4-9.
3. Kuzyakov O.N., Lapteva U.V., Andreeva M.A. Electronic-projecting moire method applying CBR-technology В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. 2018. С. 012072.
4. Лантева У.В. Исследование состояния поверхности объекта с использованием модели на основе нечетких правил, Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании : материалы VIII Международной научно-технической конференции; отв. ред. О. Н. Кузяков. – Тюмень: ТИУ, 2019. – 324 с. – Текст: непосредственный. С. 52-56.

ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРА ЧАСТОТ МИКРО- И НАНО РЕЗОНАТОРА ОТ ДАВЛЕНИЯ

© 2021 г. Аким Гайфуллинович Хакимов

*ИМех им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, 450054, Уфа, пр-т Октября, 71
hakimov@anrb.ru*

Среди многочисленных видов применения микро- и нанопленок, нанопроволок, нанотрубок может быть указано также использование их в качестве детекторов и сенсоров в химии, биологии и т.д. В [1, 2] дается обзор статей, посвященных главным образом консольным резонаторам из нанопленок и нанопроволок. По удовлетворительному согласию собственных частот изгибных колебаний с данными экспериментов делается вывод о приемлемости для анализа модели тонкой балки. Определены собственные частоты изгибных колебаний резонатора с прямоугольным поперечным сечением. Учитывается поверхностный эффект, обусловленный взаимодействием давления газа и разности площадей выпуклой и вогнутой поверхностей резонатора. Эта разность возникает при деформации изгиба. Упругий стержень круглого или прямоугольного сечения с диаметром d и размерами $b \times h$, длиной L закреплен жестко по концам. Применимость классических уравнений деформации тонких элементов типа стержней, пластинок, оболочек для описания поставленной задачи будем оценивать по такой интегральной характеристике как собственные частоты. В силу этих оценок будем пользоваться соотношениями классической механики [3]. Предполагаем, что размеры d, h имеют порядок 10 нм и отношения $L/d, L/h$ имеют порядок $10^1 - 10^3$. Дальнейшие рассуждения будем проводить для случая $b > h$ для полосы единичной ширины.

Линейное колебательное движение стержня описывается уравнением [3]

$$EJ \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - P \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \rho F \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = q, \quad (1)$$

где E, ρ, F, J - модуль упругости, плотность материала, площадь поперечного сечения и момент инерции, x, t - продольная координата и время, w - прогиб, P - продольная растягивающая сила, q - поперечная распределенная сила.

Отсчитывая координату x от точки крепления, принимая функцию прогиба в виде $w(x)\exp(i\omega t)$ и используя в дальнейшем обозначения $\xi = x/L, w = w/L$, уравнение (1), а также граничные условия для защемленных опор представим в виде

$$\frac{\partial^4 w}{\partial \xi^4} - 2\alpha \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} - k^2 w = 0, \quad \alpha = \frac{PF(1-2\nu)L^2}{2EJ}, \quad k^2 = \frac{\rho FL^4 \omega^2}{EJ} = \frac{12(1-\nu^2)\rho L^4 \omega^2}{Eh^2}, \quad (2)$$

$$w = 0, \quad \partial w / \partial \xi = 0 \quad (\xi = 0; 1).$$

где ω – круговая частота. Это уравнение справедливо для случая отсутствия продольных перемещений в обеих опорах стержня (полосы).

Таблица.

Три низшие собственные частоты f_1, f_2 и f_3 для нанорезонатора.

p , МПа	Источник	Метод	f_1 (ГГц)	f_2 (ГГц)	f_3 (ГГц)
-	[4]	MD	2,71–2,78	7,28–7,33	13,8–13,9
-	[5]	$AB-E$	2,83	7,81	15,3
0,1	(2)	$AB-E$	2,77	7,62	14,94
50,0	(2)	$AB-E$	2,79	7,65	14,98
- 10,0	(2)	$AB-E$	2,76	7,61	14,93

Результаты MD моделирования (молекулярная динамика) при температуре 4,2 К даются в первой строке (Таблица), расчеты балки Бернулли–Эйлера ($AB-E$) приводятся во второй строке. Из таблицы видно, что собственные частоты, определенные из уравнения (2), ближе к результатам MD моделирования [4], чем результаты [5].

Влияние избыточного давления окружающей среды на спектр частот колебаний стержня определяется безразмерным параметром α . Он возрастает при увеличении давления и длины стержня, уменьшается с ростом изгибной жесткости. При отрицательном избыточном давлении (вакуумирование) параметр α меняет знак, частоты уменьшаются. С увеличением как распределенной, так и точечной присоединенной массы собственные частоты колебаний уменьшаются ввиду неизменной изгибной жесткости стержня. Перемещение точечной массы к центру приводит к уменьшению нечетных собственных частот, в то время как четные частоты не меняются. По измеренной первой частоте может быть определено избыточное давление, действующее на поверхность стержня (за исключением торцевых поверхностей). По измеренным двум частотам изгибных колебаний определяется точечная присоединенная масса и ее координата. Эти результаты могут быть использованы при моделировании работы резонаторов, в том числе микро и нанорезонаторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Raman A., Melcher J., Tung R. Cantilever dynamics in atomic force microscopy // Nano Today. 2008, V. 3. No. 1–2. P. 20 — 27. DOI: 10.1016/S1748-0132(08)70012-4.
2. Eom K., Park H. S., Yoon D. S., Kwon T. Nanomechanical resonators and their applications in biological/chemical detection: Nanomechanics principles // Physics Reports-Review Section of Physics Letters. 2011. V. 503. No. 4–5. P. 115 — 163. DOI: 10.1016/j.physrep.2011.03.002.
3. Тимошенко С.П. Курс теории упругости. Киев: Наукова думка, 1972. 503 с.
4. Olsson P. A. T. Transverse resonant properties of strained gold nanowires // Journal of Applied Physics. 2010. V. 108. No. 3. P. 034318 — 034318-10. DOI: 10.1063/1.3460127.
5. Olsson P. A. T., Lidström P. C. and Park H. S. The influence of shearing and rotary inertia on the resonant properties of gold nanowires // Journal of Applied Physics. 2010. V. 108. No. 10. P. 104312-9. DOI: 10.1063/1.3510584.

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ГИДРОИСПЫТАНИИ СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ

© 2020 г. Мария Михайловна Кутень^{1*}, А. Л. Бобров^{1**}

¹ – ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»,
630049 г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 191

* - mariabychkova94@mail.ru; ** - beaver@stu.ru

Акустико-эмиссионный (АЭ) метод неразрушающего контроля является одним из самых перспективных, развивающихся способов постоянного мониторинга опасных производственных объектов, к которым относятся сосуды давления, трубы и трубопроводы, резервуары и др. [1, 2]. АЭ контроль обеспечивает непрерывную оценку технического состояния объекта, благодаря чему возможно предупреждение чрезвычайных ситуаций, возникающих из-за аварий.

Актуальность работы обусловлена установкой взаимосвязи между параметрами сигналов АЭ и параметрами источника, необходимой для критериальной оценки технического состояния объекта контроля.

Цель исследования заключалась в анализе параметров сигналов АЭ, полученных при гидравлическом испытании сосудов давления.

В ходе работы проводили нагружение гидростатическим давлением сосудов, работающих под давлением, объемом 0,04 м³ как без явных дефектов, так и с концентраторами напряжений, выполненных в виде нормально ориентированных к поверхности пазов глубиной 1...3,5 мм в стенке толщиной 6 мм и длиной 25-30 мм. Концентраторы изготавливали отрезным кругом шириной 0,8 мм и диаметром 20 мм. Сосуды были произведены из стали Ст 20, расчет на прочность осуществлялся отдельно для цилиндрических обечаек и днищ [3].

Предварительно на сосуд было установлено две акустические антенны, каждая из которых состояла из четырех преобразователей акустической эмиссии, и тензодатчики для фиксации возникающих напряжений в материале сосуда в поперечном направлении (рис. 2, а). Статическое нагружение проводили в три этапа со скоростью 3,0...5,0 МПа/мин по схеме, приведенной на рис. 2, б. Регистрацию сигналов осуществляли с помощью многоканальной цифровой диагностической акустико-эмиссионной системы СЦАД 16.03 и быстродействующей тензометрической системы «Динамика-3» [4, 5].

Для стали Ст 20 максимальное напряжение испытаний приближалось к пределу упругости. При этом регистрировались сигналы АЭ, возникающие в материале сосуда только в упругой области.

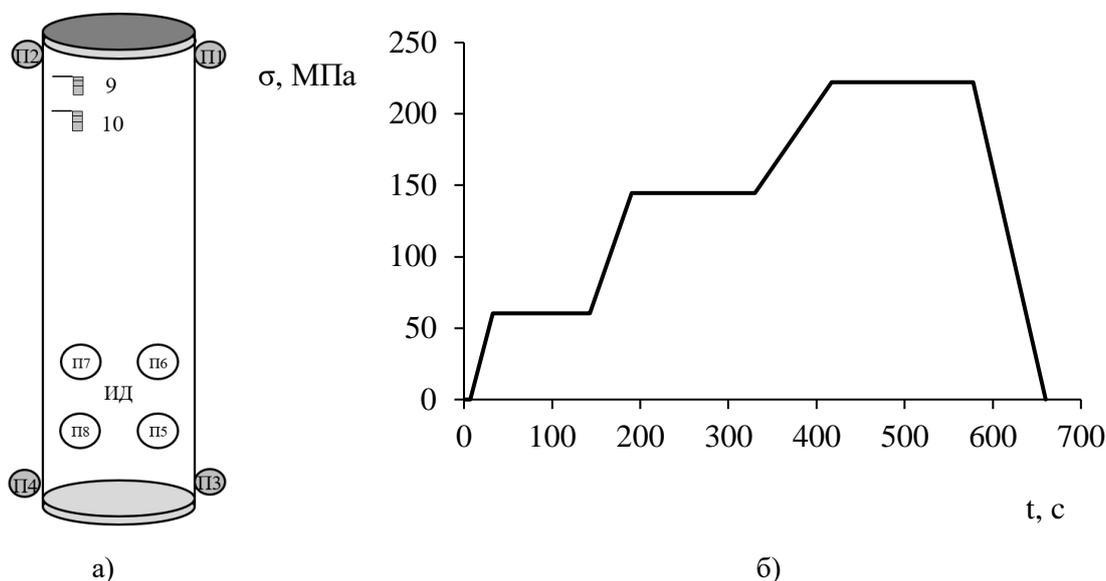


Рис. 1. а) Схема расположения датчиков на сосуде давления, где П1-П8 – преобразователи акустической эмиссии; 9-10 – тензодатчики; ИД – искусственный дефект;
 б) Схема гидравлического нагружения сосудов давления.

Анализ полученных данных показал, что значительный рост активности сигналов АЭ наблюдается на этапах подъема и сброса нагрузки, что связано с происходящими изменениями в материале объекта контроля, а во время выдержки, напротив - низкий. При увеличении глубины искусственного дефекта суммарный счет сигналов АЭ изменяется незначительно, на количество сигналов АЭ влияет форма и размер концентратора напряжений. Полученные результаты показывают, что зависимость количества зарегистрированных сигналов АЭ для всех испытанных сосудов от числа нагружений имеет одинаковый характер изменения несмотря на разную величину нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бореико Д. А., Быков И. Ю., Смирнов А. Л. Чувствительность метода акустической эмиссии при обнаружении дефектов в трубных изделиях //Дефектоскопия. 2015. №. 8. С. 24-33.
2. ГОСТ Р 52727-2007. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования.
3. ГОСТ Р 54522-2011. Сосуды и аппараты высокого давления. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических обечаек, днищ, фланцев, крышек. Рекомендации по конструированию.
4. Stepanova L.N., Petrova E.S., Chernova V.V. Strength tests of a cfrp spar using methods of acoustic emission and tensometry. // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. Т. 54. № 4. P. 243—248.
5. Степанова Л. Н., Кабанов С. И., Лебедев Е. Ю. и др. Быстродействующая микропроцессорная тензометрическая система для динамических испытаний конструкций // Контроль. Диагностика. 2006. № 7. С. 6-14.

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

Егоров Роман Александрович

(Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург)

Колганов Олег Александрович

(Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург)

Кузьмичёв Михаил Валерианович

(Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург)

Научный руководитель: Федоров Алексей Владимирович, д.т.н.

E-mail: roman1465@yandex.ru

Контроль физико-механических характеристик материала, изделий или составных частей на стадии производства, испытаний и эксплуатации, является актуальной задачей. Существующие методы контроля, которые позволяют измерять физико-механические свойства материалов, являются либо разрушающими и предполагают изготовление специальных образцов-свидетелей, либо предусматривают лабораторные условия испытаний. В настоящее время, для решения задачи по неразрушающему контролю (НК) изделий или составных частей на этапах жизненного цикла широкое применение находят безобразцовые методы контроля физико-механических характеристик.

Безобразцовые методы контроля подразумевают контроль без изготовления образцов-свидетелей. Применение такого подхода возможно при эксплуатации измерительных приборов НК портативного исполнения, которые имеют автономное питание.

На сегодняшний день одним из методов неразрушающего контроля, который обладает достаточно большой универсальностью является метод динамического индентирования (ДИ). Данный метод позволяет проводить неразрушающие испытания изделий широкого класса материалов: от металлов и неметаллов до композитов сложного состава и конфигурации армирующих элементов. Широкое развитие вычислительных средств и элементной базы позволяет конструировать портативные измерительные приборы ДИ, не уступающие по точности стационарным приборам инструментального индентирования.

Существенный вклад в развитие метода динамического индентирования внесли такие авторы, как Рудницкий В.А., Крень А.П., Рабцевич А.В. и др. В настоящее время большинство исследований сосредоточено на совершенствовании методической части обработки результатов измерений физико-механических характеристик. Алгоритмическое и программно-техническое обеспечения процессов обработки информативных сигналов и представление результатов в приборах и средствах контроля не получило должной проработанности.

Целью работы является повышение достоверности контроля механических характеристик металлов методом динамического индентирования. Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи по разработке:

- компьютерной модели процесса ударно-контактного взаимодействия индентора с испытуемым материалом;
- прототипа первичного преобразователя прибора ДИ;
- алгоритма первичной обработки результатов измерения;
- аппаратной части измерительного блока регистрации ЭДС.

Аппаратная часть опытного образца прибора динамического индентирования состоит из первичного преобразователя, измерительного блока с высокоскоростным аналого-цифровым преобразователем, платы разработчика с программируемой логической интегральной схемой и модуля беспроводного интерфейса передачи данных на управляющий компьютер.

В работе рассматривается разработка первичного преобразователя и аппаратной части прибора динамического индентирования. Выходным сигналом с первичного преобразователя является ЭДС, пропорциональная скорости внедрения индентора в испытуемый материал. Электрический сигнал оцифровывается измерительным блоком с частотой дискретизации 40МГц и разрядностью в 12 бит и сохраняется в оперативную память. Проводится преобразование сигнала ЭДС в диаграммы изменения контактного усилия и глубины внедрения ударника, несущие информацию о физико-механических характеристиках исследуемого материала. Алгоритмическая обработка и отображение результатов измерения выполняется на управляющем компьютере. Алгоритм обработки дискретного кортежа ЭДС реализован в пакете прикладных программ MATLAB.

Производится сравнение результатов измерений, полученных при помощи прототипа прибора ДИ, с результатами компьютерного моделирования.

Результатом разработки является прототип прибора динамического индентирования, позволяющий получать диаграммы изменения контактного усилия и внедрения ударника, а также значение твердости испытуемого материала.

ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ С РАЗЛИЧНЫМ ИСХОДНЫМ ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ ПРИ УПРУГОМ РАСТЯЖЕНИИ

© 2021 г. Анна Моисеевна Поволоцкая^{1*}, С. М. Задворкин^{1**}, Е. А. Путилова^{1***},
А. Н. Мушников^{1****}

¹ – ИМАШ УрО РАН, 620049, Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34

* - us@imach.uran.ru; ** - zadvorkin@imach.uran.ru; *** - tuevaevgenya@mail.ru;

**** - mushnikov@imach.uran.ru

Разработка методов контроля упругих деформаций, возникающих в процессе эксплуатации изделий из ферромагнитных конструкционных материалов, является актуальной задачей. В большинстве работ, посвященных решению данной задачи, не принимается во внимание предыстория материала, в то время как текущее состояние металлоконструкций, как правило, существенно отличается от заложенного в проектной документации и при выпуске с завода-производителя. В работах [1, 2] показано, что предварительная пластическая деформация статическим растяжением образцов из конструкционной стали значительно влияет на поведение их магнитных характеристик при последующем упругом деформировании. С учетом того, что в течение своего жизненного цикла изделия подвергаются чаще всего циклическим нагрузкам, представляет интерес исследование, аналогичное проведенным в [1, 2], но в котором предварительное деформирование осуществляется циклическим нагружением.

В настоящей работе изучено влияние предварительного отнулевого циклического растяжения на различное количество циклов конструкционной стали 08Г2Б на поведение ряда ее магнитных характеристик в условиях последующего статического упругого одноосного растяжения.

Объектом исследования служили плоские образцы с головками, циклически испытанные на различное количество циклов: 0, 30000, 50000, 100000 и 300000 циклов по схеме отнулевого растяжения с амплитудой 300 МПа, немного превышающей значение условного предела текучести. Циклически деформированные образцы подвергали упругому одноосному растяжению с одновременным измерением их магнитных характеристик.

В работе на примере стали 08Г2Б показано, что предыстория в виде предварительного циклического нагружения сказывается на последующих закономерностях изменения магнитных параметров материала при его упругом деформировании. Данное обстоятельство следует учитывать при разработке магнитных методик оценки параметров напряженно-деформированного состояния элементов

стальных конструкций. Поведение всех исследованных магнитных характеристик, в том числе магнитострикции, при статическом растяжении свидетельствует об усилении напряжений сжатия, обусловленных предварительным циклическим нагружением, в направлении действия циклической нагрузки.

Исследования магнитострикции образцов из стали 08Г2Б, подвергнутых предварительному отнулевому циклическому растяжению, показали, что последующее деформирование статическим растяжением на определенном этапе приводит к исчезновению положительного участка на полевых зависимостях магнитострикции, при всех значениях магнитного поля магнитострикция принимает отрицательные значения. Диапазоны растягивающих напряжений, в которых происходит смена знака магнитострикции, примерно соответствуют диапазонам напряжений, в которых формируются экстремумы на зависимостях от растягивающей нагрузки магнитных характеристик, измеренных в продольном направлении.

Установлено, что такие магнитные характеристики, как продольная коэрцитивная сила, максимальная магнитная проницаемость, остаточная индукция, а также величина максимума дифференциальной магнитной проницаемости образцов из стали 08Г2Б, подвергнутых циклическому нагружению на разное количество циклов, при последующем статическом растяжении изменяются однозначно в диапазоне напряжений от 0 МПа до 100 МПа, а поперечная коэрцитивная сила демонстрирует монотонное возрастание в диапазоне от 100 МПа до 200 МПа. При этом разность значений коэрцитивной силы, измеренных в продольном и поперечном направлениях, монотонно уменьшается во всем интервале приложенных напряжений 0...200 МПа. Полученные зависимости магнитных характеристик исследованной стали от напряжений статического растяжения при различном количестве циклов предварительного циклического нагружения могут быть использованы при разработке методик оценки параметров напряженно-деформированного состояния изделий из стали 08Г2Б.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-48-660035_p_a.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горкунов Э.С., Субачев Ю.В., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М. Влияние предварительной пластической деформации на поведение магнитных характеристик высокопрочной трубной стали контролируемой прокатки при упругом одноосном растяжении (сжатии) // Дефектоскопия. 2015. № 9. С. 49–60.
2. Горкунов Э.С., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М., Путилова Е.А. Сравнительный анализ поведения магнитных характеристик пластически деформированного металла различных зон сварной трубы при упругой деформации // Дефектоскопия. 2017. № 9. С. 26–34.

КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ ГРАДИЕНТНОГО СЛОЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ УГЛЕРОД-КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2021 г. Хохлова Елена Дмитриевна*, А. В. Федоров^{1,2**}

^{1,2} – *Университет ИТМО, 197101 Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49*

* - *79818062369@mail.ru*; ** - *afedor62@yandex.ru*

Углерод-керамические композиционные материалы (УККМ) на сегодняшний день имеют приоритетное значение в авиа- и ракетостроительной отрасли, судостроении, энергетике, а также в сферах, основным фокусом которых являются изделия из теплонапряженных материалов. УККМ обладают рядом уникальных свойств, в частности, высокой прочностью при повышенных температурах, низким коэффициентом линейного расширения, высоким коэффициентом теплопроводности, а также низкой плотностью, что позволяет использовать их в ответственных узлах изделиях специальной техники, работающей в агрессивных средах. Для обеспечения необходимой стойкости при эксплуатации изделий из УККМ в сложных условиях обтекания химическим, высокотемпературным и высокоскоростным потоком продуктов сгорания топлива, на изделие из УККМ дополнительно наносят специальное защитное покрытие. Особенность нанесения данного покрытия обуславливает диффузию его молекул в поверхностные слои УККМ, в результате чего слой покрытия приобретает градиентный характер. От толщины градиентного слоя защитного покрытия зависят свойства стойкости изделия к внешним воздействиям теплового и газодинамического потока. В связи с этим, актуальным является измерение толщины данного слоя. Целью работы является выбор и обоснование метода контроля толщины градиентного слоя покрытия, нанесенного на внешнюю поверхность изделия из УККМ.

Исследуемым объектом является изделие из УККМ с защитным покрытием из карбидов редкоземельных металлов. С учетом конструктивных особенностей контролируемого изделия, традиционно используемые методы контроля, подходящие для композиционных материалов, такие как: ультразвуковой, радиационный, термографический, оптический, имеют ограниченную применимость к УККМ. В связи с этим, представляет интерес использование методов вихретокового вида неразрушающего контроля.

За счет того, что огромное количество волокон внутри изделия из УККМ имеют между собой электрический контакт, то можно рассматривать углеродное волокно, как материал с некоторым интегральным значением электропроводности, изменяющейся в зависимости от толщины покрытия. Значение толщины покрытия по формуле связано со значением вносимого (разностного) напряжения $\dot{U}_{\text{вн}}$, возникающего вследствие влияния

изделия с покрытием на обмотку преобразователя. При изменении значения $\dot{U}_{\text{вн}}$, меняется и его фаза $\Delta\varphi$, что обуславливает использование вихретокового фазового метода контроля. Степень взаимосвязи вихретокового преобразователя и объекта контроля отображает обобщенный параметр β , зависящий от значения электропроводности материала контролируемого изделия. В свою очередь, зависимость фазы $\dot{U}_{\text{вн}}$ от обобщенного параметра β близка к линейной. Как видно из рис. 1, изменение значения β на единицу, ведет к изменению фазы примерно на $17,5^\circ$, что обуславливает достаточный уровень относительной чувствительности к контролируемому параметру, доказывая возможность использования вихретокового метода для контроля градиентного слоя покрытия на изделии из УККМ.

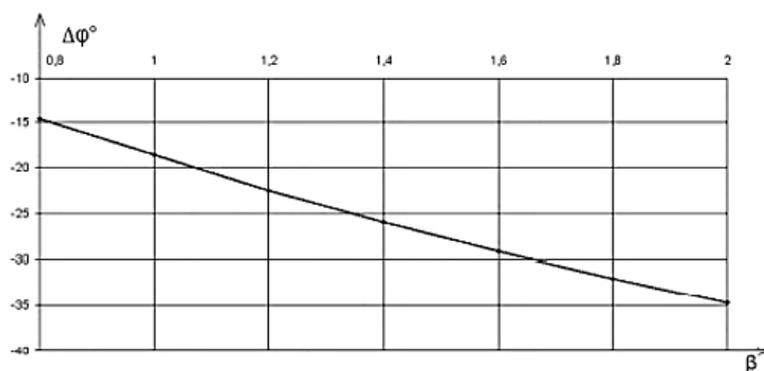


Рисунок 1. Зависимость фазы вносимого напряжения от обобщенного параметра β

Таким образом, анализ существующих методов контроля показал, что наиболее перспективным является вихретоковый метод. Для совершенствования его применимости в указанной области необходимо проведение дальнейших работ, в частности, получение регрессионной зависимости толщины градиентного слоя от значения электропроводности для оценки чувствительности метода к контролируемому параметру.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сясько В.А. Теория и методы создания электромагнитных приборов контроля толщины покрытий и стенок изделий. СПб.: «Константа»,— 2015. 372 с.
2. Федоров А.В. Технологии неразрушающего контроля физико-механических характеристик компонентов углерод-углеродных композиционных материалов: сборник трудов 1-й дистанционной научно-технической конференции НККМ–2014. СПб.— 2015. 372 с.
3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 2: В 2 кн. — М.: Машиностроение. 2003. — 688 с.
4. Фадина Е. А. Методические указания по выполнению РГР и курсового проектирования по дисциплине «Электромагнитный контроль» для студентов направлений 200100.62 и 12.03.01 «Приборостроение». — Омск, 2015. —32 с.

МЕТОДИКА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СТАЛЕЙ ПЕРЛИТНОГО КЛАССА НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ИХ МИКРОСТРУКТУРЫ.

© 2021 г. Магдеев Радик Гильфанович^{1*}, А. Г. Ташлинский^{1**}
¹ – Ульяновский Государственный Технический Университет (УлГТУ),
432027 г. Ульяновск, улица Северный Венец, д.32
* - radiktd2@yandex.ru; тел.: 8-937-273-5444; ** - tag@ulstu.ru;

Малоуглеродистые низколегированные перлитные доэвтектоидные стали являются основной продукцией черной металлургии. Одной из ключевых проблем при производстве и эксплуатации изделий из стали является контроль соответствия изделий требуемым характеристикам, в частности механическим свойствам (твердость, прочность, вязкость, упругость, пластичность), остаточному ресурсу и др. [1]. Многочисленные исследования показали связь параметров микроструктуры стали и механических свойств металлов и сплавов [2, 3 и др.]. Микроструктура стали представляет собой совокупность множества зерен в виде прилегающих друг к другу кристаллитов, отличающихся по размеру, форме и пространственной ориентации. При этом на практике многие микроструктурные исследования проводится визуально экспертами, что увеличивает время анализа и вносит в его результаты элемент субъективности.

Предлагаемая методика, основы которой были изложены в работе [4], с использованием методов обработки цифровых изображений позволяет автоматизировать процесс получения микроструктурных характеристик. При этом обработка металлографических изображений включает в себя три основных этапа:

1 этап. Предварительная обработка исследуемых изображений, направленная на увеличение точности и достоверности нахождения микроструктурных параметров зерен перлита. Содержит операции: сокращения цветности изображения с целью упрощения последующих вычислений; выделения рабочей области обработки для исключения малоинформативных участков изображения; фильтрации изображения для компенсации высокочастотных искажений, вызванных особенностями тракта металлографического микроскопа; выравнивания яркости, компенсирующего неравномерность освещённости микрошлифа; эквализации изображения, выравнивающей гистограмму яркостей изображения.

2 этап. Выделение на металлографических изображениях областей, соответствующих зернам перлита, по которым в дальнейшем находятся микроструктурные параметры. Реализуется процедурами: сегментации, направленной на выделение областей перлитных зёрен, математической морфологии для устранения внутренних разрывов в изображениях зёрен и исключения из дальнейшего анализа мелких

объектов, выделения внешних границ и построения выпуклых оболочек зерен для последующего расчета по ним микроструктурных параметров.

3 этап. Оценивание микроструктурных параметров зерен перлита, включающее гауссову фильтрацию выпуклых оболочек выделенных зерен, формирование эталонов для нахождения параметров зерен. Оценка параметров зерен перлита производится с использованием метода псеводградиентной идентификации [4], основанного на безыдентификационной псеводградиентной адаптации изображений [5]. Преимуществом предлагаемого метода является то, что параметры эталонов адаптивны и подстраиваются под параметры пятен, представленных выпуклыми оболочками.

Разработанная методика позволяет по металлографическим изображениям в режиме реального времени определять следующие параметры: отношение перлита к ферриту, зернистость перлита, общий вектор направленности зёрен, средний размер зёрен, разброс размеров зёрен, степень упорядоченности ориентаций зерен, среднее значение коэффициента анизотропности формы.

Проведенные исследования показали, что средние размеры зерен, автоматизировано найденные с использованием предложенной методики, и рассчитанные по традиционным методам ГОСТ 5639 отличаются не более чем на 5 %. Методика может быть использована для определения прочностных характеристик металла на разных стадиях производства и эксплуатации: от контроля качества на заводе до определения остаточного ресурса. Апробация методики на изображениях микрошлифов нефтяных и водных трубопроводов различного срока эксплуатации показала ее высокую эффективность.

Работа поддержана грантами РФФИ № 19-29-09048 и № 19-47-730004.

ЛИТЕРАТУРА

1. Материаловедение: Учебник для вузов. под общ. ред. Б.Я. Арзамасова, Г.Г. Мухина. 8-е изд., М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2008. 648 с.
2. Лисин Ю.В., Неганов Д.А., Гумеров К.М. Исследования изменений свойств металла трубопроводов в процессе эксплуатации: обобщение результатов и перспективные разработки Уфимской научной школы // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. Т.2. №2. С. 22—30.
3. Гребеньков С.К., Скуднов В.А., Шацов А.А. Деформация и разрушение низкоуглеродистых мартенситных сталей. // Металловедение и термическая обработка металлов. 2016. №2. С. 33—38.
4. Magdeev R.G., Tashlinskiy A.G. Method for identification of perlite-class steel microstructure parameters using metallographic images // CEUR Workshop Proceedings. V.1901. 2017. P. 169—175.
5. Tashlinskii A.G. Pseudogradient Estimation of Digital Images Interframe Geometrical Deformations // Vision Systems: Segmentation & Pattern Recognition, 2007. Vienna, Austria: I Tech Education and Publishing. P. 465—494.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

Определение скорости ультразвуковых волн (УЗ) с высокой точностью позволяет получать информацию о структурном состоянии и физико-механических свойствах материалов. В данной статье были проведены измерения с использованием установки, описанной в опубликованной ранее статье, состоящей из генератора и усилителя [1].

Целью работы является оценка точности импульсного метода определения скорости УЗ волн с использованием современных преобразователей и измерительной техники.

В эксперименте по определению скорости УЗ использованы концевые меры длины 1 класса точности по ГОСТ 9038-90 [2]. Отобрано 4 образца разной длины из одного набора (70 мм, 80 мм, 90 мм, 100 мм), произведен их нагрев окунанием в горячую воду с одновременной термометрией с использованием цифрового термометра и измерение времени пробега УЗ продольных волн. Зависимость рассчитанной скорости ультразвука от температуры отобранных образцов представлена на рисунке (рис. 1).

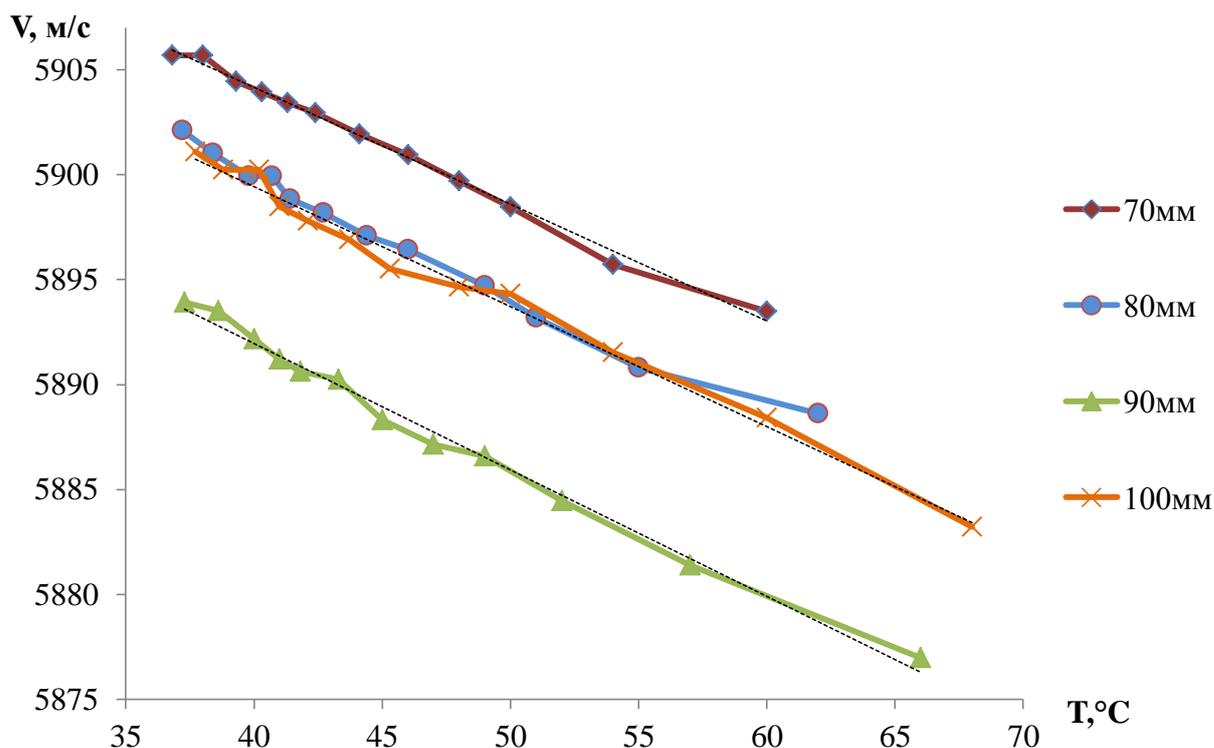


Рисунок 1 Результаты определения скорости продольных волн образцов концевых мер длины при различной температуре.

По результатам эксперимента видно, что образцы с толщиной 100 мм и 80 мм имеют идентичную скорость распространения продольных волн. Это говорит о том, что данные образцы изготовлены из одного сплава стали, а образцы с длиной 70 мм и 90 мм имеют другой структурный состав. Данные измерения подтверждают достоверность и точность измерения скорости УЗ волн.

Для расчета погрешности измерений были произведены 5-кратные замеры времени распространения УЗ волн при комнатной температуре (20°C), рассчитаны средние значения скорости продольных волн, абсолютная и относительная погрешности с доверительной вероятностью 0,95 (табл. 1).

Таблица 1

Результаты измерений скорости продольных волн при комнатной температуре

Толщина, мм (±0,6 мкм для 1 класса точности)	Среднее значение времени распространения, нс	Среднее значение скорости распространения, м/с	Абсолютная погрешность, м/с	Относительная погрешность, %
100	16924,1	5908,73	1,6	0,03
90	15246,0	5903,19	1,3	0,02
80	13537,4	5909,55	1,5	0,03
70	11835,7	5914,31	1,9	0,03

Анализируя результаты, погрешность измерения установки не превышает ±2 м/с, что говорит о достаточной точности для определения различия структурного состава твердых материалов, в частности стали различных марок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гущина Л.В., Муравьев В.В., Злобин Д.В., Земсков Т.И., Нуриев В.Ф., Безрученков Г.В. Экспериментальная установка для измерения скорости упругих волн с высокой точностью // Сборник тезисов докладов V Международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле, 2019. с. 23-24.
2. ГОСТ 9038-90 Меры длины концевые плоскопараллельные. Технические условия. Москва: ИПК ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ, Дата введения 1991. Издание 2004.

Акустическая структуроскопия пружин при производстве с использованием измерения скорости рэлеевских волн

© 2021 г. Лилия Владимировна Гущина^{1*}, В.В. Муравьев^{1,2}

¹ – Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашикова, 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7

² – Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, 426067 г. Ижевск, ул. им. Татьяны Барамзиной, 34

* pmkk@istu.ru, 8(3412)776055 доб. 1132.

Для изготовления рессорных пружин подвижного состава применяют прутки из пружинных сталей 60С2А. В процессе высокотемпературной механической обработки при навивке пружин и их закалке возникает различие в скоростях охлаждения внутренней и наружной сторон витков пружины, что приводит к различию в структурном состоянии и сказывается на долговечности пружин [1].

Цель работы - исследование влияния структурных изменений в наружной и внутренней поверхности витков пружин рессорной стали на измеряемые характеристики рэлеевских акустических волн для последующей реализации акустического контроля качества термической обработки пружин.

Известно, что скорость распространения ультразвуковых волн в сплавах связана с их структурой [2]. Использование волн Рэля, распространяющихся на строго фиксированной базе, является наиболее выгодным вариантом для разработки методики структуроскопии, [3]. С целью исследования структурного состояния пружин были сконструированы 4 блока рэлеевских преобразователей для пружин разного диаметра, показанные на рис. 1.

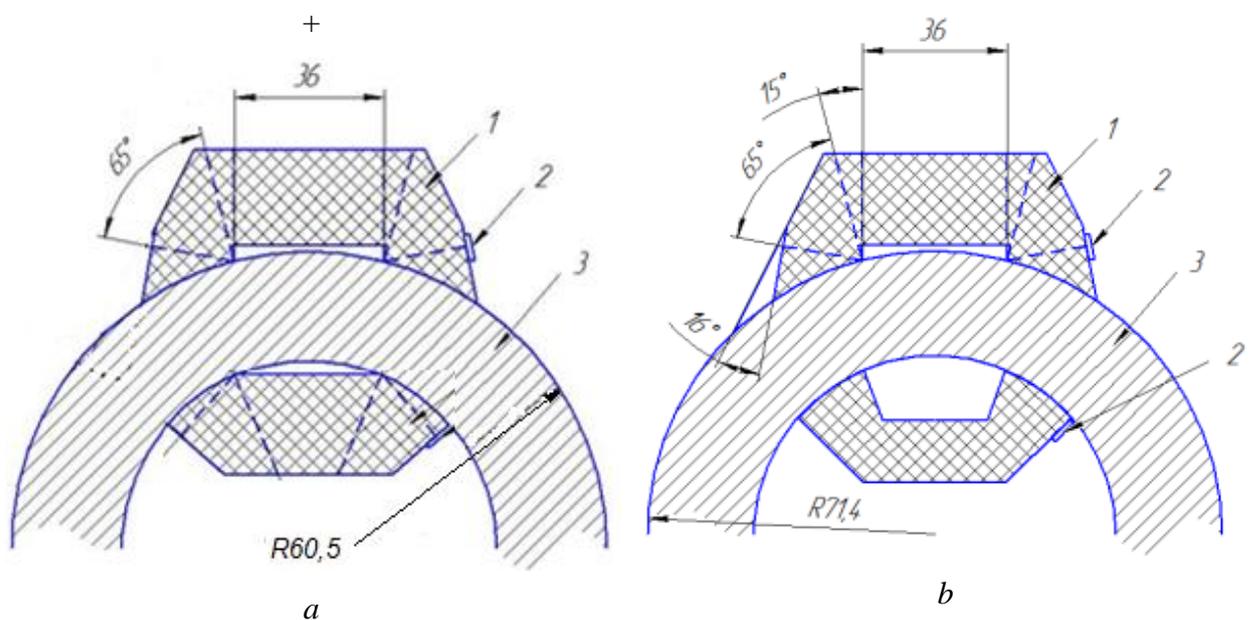


Рисунок 1 – Рэлеевские преобразователи для контроля структурного состояния пружин: *a* – преобразователи для пружин радиусом 60,5 мм, *б* – преобразователи для пружин радиусом 71,4 мм; 1 – корпус преобразователя из оргстекла, 2 – пьезоэлемент, 3 – пружина

Для исследования образцов пружин были использованы структуроскоп ИСП-12 (ультразвуковой индикатор структурных превращений) и ультразвуковой дефектоскоп ДЮ-1000. Измерения проводились на образцах-вырезках пружин внешними диаметрами 143 мм и 121 мм, изготовленных по технологии ВТМО в разное время из разных партий прутков. Результаты представлены в табл. 1..

Таблица 1

Относительные изменения частоты автоциркуляции ($\Delta f_a / f_a$) и скорости в исследованных образцах ($\Delta C_R / C_R$), с использованием ИСП-12, и относительные изменения времени прохождения сигнала ($\Delta t / t$) и скорости ($\Delta C_R / C_R$), зарегистрированных дефектоскопом ДЮ1000

№ образца	D, мм	ИСП-12		ДЮ1000	
		$\Delta f_a / f_a$	$\Delta C_R / C_R$	$\Delta t / t$	$\Delta C_R / C_R$
1	143	0,0072	0,0155	0,0018	0,0041
2		0,0043	0,0092	0,0030	0,0066
3		0,0042	0,0091	0,0033	0,0049
4		0,0038	0,0089	0,0030	0,0074
5	121	0,0046	0,0103	0,0033	0,0090
6		0,0044	0,0096	0,0025	0,0090
7		0,0060	0,0134	0,0044	0,0098

Анализ результатов показал, что рост скорости волны на внутренней поверхности витка в зоне контакта с оправкой относительно внешней стороны витка, сигнализирует о неполной закалке стали 65С2Г в этой зоне в процессе ВТМО. Относительная разница скоростей в разных образцах пружин составляет до (80 м/с), что является существенной величиной для оценки качества ВТМО.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Титов А.В.* Влияние режимов термической обработки на микроструктуру пружин ответственного назначения из стали 60С2А и титанового сплава ВТ16 // *Металлообработка.* - 2015. - № 5 (89). - С. 43-49.
2. *Муравьев В.В., Муравьева О.В., Кокорина Е.Н.* Акустическая структуроскопия и дефектоскопия прутков из стали 60С2А при производстве пружин с наноразмерной структурой. // *Известия ВУЗов. Черная металлургия.* - 2013. – Вып.4. - С. 66-70.
3. *Муравьев В.В., Муравьева О.В., Петров К.В.* Связь механических свойств пруткового проката из стали 40Х со скоростью объемных и рэлеевских волн // *Дефектоскопия.* - 2017. - № 8. - С. 20-28.

МЕТОД АППРОКСИМАЦИИ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ СЕРДЕЧНИКОВ ФЕРРОЗОНДОВ

© 2021 г. **Владимир Сергеевич Безкорвайный***, **В. В. Яковенко***, **С. Н. Швец****
Луганский государственный университет имени Владимира Даля,
91034 г. Луганск, кв. Молодежный 20а
* - volk207@yandex.ru; ** - myblok@yandex.ru

Предлагается новый метод расчета зависимости функции дифференциальной магнитной проницаемости (ДМП) разомкнутых сердечников феррозондовых чувствительных элементов. Зависимость $H(B)$ материала сердечников аппроксимируется кубическими сплайнами. Применение сплайнов повышает точность аппроксимации и упрощает процедуру расчета. На i -ом участке аппроксимации имеем:

$$H_M(B) = a_i(B - B_i)^3 + b_i(B - B_i)^2 + c_i(B - B_i) + d_i. \quad (1)$$

При $\mu_M \gg t$, можно считать, что на каждом участке аппроксимации размагничивающая напряженность поля разомкнутого сердечника равна $H_\phi = (B - B_i) / (\mu_0 \cdot m)$. Поскольку $H_M = H - H_\phi$, где H – напряженность магнитного поля вне сердечника, для i -го участка аппроксимации имеем:

$$H = a_i(B - B_i)^3 + b_i(B - B_i)^2 + c_i(B - B_i) + d_i + \frac{B - B_i}{\mu_0 \cdot m}. \quad (2)$$

Дифференцируя левую и правую стороны (2), получаем:

$$\mu(B) = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} = \frac{1}{\mu_0 \left[3a_i(B - B_i)^2 + 2b_i(B - B_i) + c_i \right] + \frac{1}{m}}. \quad (3)$$

Остается установить зависимость между индукцией и напряженностью внешнего поля $B(H)$. Для этого предлагается следующий метод последовательных приближений (рис. 1) решения нелинейного уравнения $H = H(B) + (1/\mu_0 \cdot m)B$. Пусть мы имеем некоторое значение внешнего поля H , эту величину считают первым значением размагничивающего поля $H_\phi^{(1)}$. По формуле $B^{(1)} = \mu_0 m H_\phi^{(1)}$ определяется первое приближение магнитной индукции. По формуле (1) рассчитывается напряженность поля внутри материала $H_M^{(1)}$ и находится второе приближение $H_\phi^{(2)}$: $H_\phi^{(2)} = H_\phi^{(1)} - H_M^{(1)}$, для n -го приближения $H_\phi^{(n)} = H_\phi^{(1)} - H_M^{(n-1)}$. Процесс расчета повторяется до тех пор, пока $H_\phi^{(n-1)} - H_\phi^{(n)} \leq \Delta H_\phi$, где ΔH_ϕ – заданная погрешность расчета.

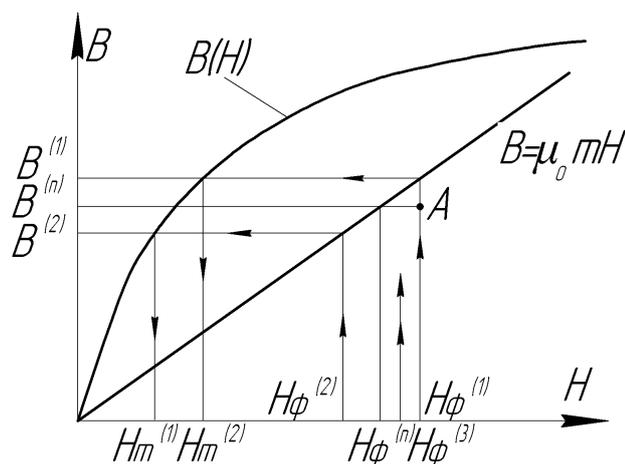


Рис. 1. Метод последовательных приближений расчета

Процесс последовательных приближений сходится, так как каждое новое значение H_ϕ находится между двумя предыдущими. В результате расчета имеем величину индукции $B^{(n)}$, которая соответствует выбранному значению напряженности поля H . С помощью (3) определяется $\mu(B)$ и, таким образом, устанавливается соответствие между значением напряженности внешнего поля H и дифференциальной магнитной проницаемостью.

Аппроксимация функции $H_m(B)$ осуществляется упрощенным методом, при котором коэффициенты сплайна на i -ом участке ($H_i \leq H \leq H_{i+1}$) определяются по данным, полученным на четырех интервалах (H_{i-1}, B_{i-1}) ; (H_i, B_i) ; (H_{i+1}, B_{i+1}) ; (H_{i+2}, B_{i+2}) для которых оправданы следующие соотношения:

$$a_i = (H_{i+2} - 3H_{i+1} + 3H_i - H_{i-1}) \frac{1}{6h^3}; \quad e_i = (H_{i+1} - 2H_i + H_{i-1}) \frac{1}{2h^2};$$

$$c_i = (6H_{i+1} - 3H_i - 2H_{i-1} - H_{i+2}) \frac{1}{6h}; \quad d_i = H_i,$$

здесь h – длина интервалов аргумента.

Определение значений ДМП для заданных величин H может осуществляться с помощью компьютерных программ. Расчеты показывают, что точность аппроксимации $\mu(H)$ выполняется с ошибкой, не превышающей 1-2%. Рассмотренный выше метод аппроксимации зависимости $\mu(H)$ может использоваться для компьютерного расчета функции преобразования феррозондовых датчиков механических величин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев Ю. В. Феррозондовые приборы. Ленинград: Издательство «Энергия». 1986. – 188 с.

ВОЛНОВОДНЫЙ АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ВАЛОВ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ С ОСЕВЫМ ОТВЕРСТИЕМ НА НАЛИЧИЕ ПРОДОЛЬНЫХ ВНУТРЕННИХ ТРЕЩИН

© 2021 г. О.В. Муравьева^{1,2*}, Ю.В. Мышкин^{1*}, Д.В. Злобин^{1*}, М.А. Синцов^{1*},
Юлия Олеговна Санникова^{1*}

¹ – ФГБОУ ВО Ижевский государственный технический университет имени
М.Т. Калашникова, 426069 Ижевск, Студенческая, № 7

² – ФГБУН УдмФИЦ УрО РАН, 426067 Ижевск, им. Татьяны Барамзиной, 34
*pmkk@istu.ru

Центробежные насосы являются самыми распространенными в мире. Базовой деталью, на которую при работе насоса действует нагрузка – передача мощности от двигателя к рабочим колесам насоса, является вал центробежного насоса. Деталь обычно изготавливается из горячекатаного или калиброванного проката углеродистой или специальной стали, подвергается пластической деформации и в последующем проходит термическую обработку (нормализация, отжиг или улучшение – в зависимости от типа стали), проходит процессы прошивки (создание осевого отверстия) и механической обработки. В процессе прошивки вала могут появиться концентраторы напряжений – продольные радиальные трещины напряжений (рис.1).

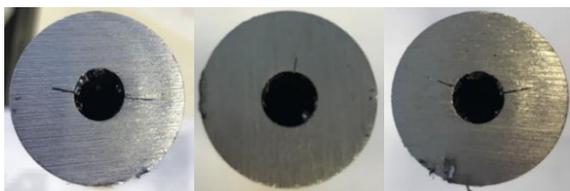


Рисунок 1

Продольные радиальные трещины
прутка-заготовки вала с осевым отверстием

Поверхностные методы неразрушающего контроля (НК) не обеспечивают возможность выявления такого рода дефектов. Для ультразвуковых контактных методов имеется сложность контроля таких объектов, обусловленная малым диаметром, отклонениями от соосности и по диаметру осевого канала, необходимость механизации и низкая производительность, требующая поступательно-вращательного перемещения объекта.

Перспективным для контроля такого рода деталей является волноводный акустический контроль, основанный на использовании нормальных волн [1]. При разработке методики контроля использована информационно-измерительная система на базе дефектоскопов АДНШ и АДНКТ, входящая в состав УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер 586308). Одновременное использование при контроле двух типов волн (стержневой и крутильной) позволяет повысить достоверность за счет анализа двух параметров: коэффициента отражения и скорости крутильной волны. При этом стержневая волна имеет практически равномерную чувствительность к дефектам по

сечению объекта контроля (рис.2а), однако малочувствительна к дефектам, протяженным вдоль всего объекта без изменения их механического импеданса.

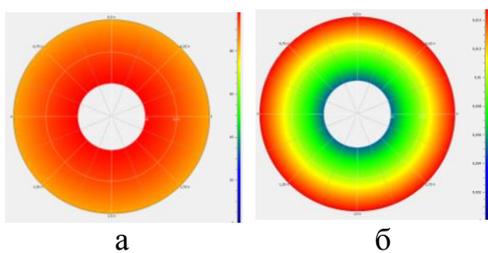


Рисунок 2 Эпюры
продольных смещений стержневой волны (а),
угловых смещений крутильной волны (б)
по сечению стальной толстостенной трубы
на частоте 50 кГц

Несмотря на снижение чувствительности вблизи отверстия (рис.2б), скорость крутильной волны для дефектов в виде продольных трещин может существенно снизиться, при этом увеличение глубины дефекта ведет к уменьшению скорости крутильной волны [1].

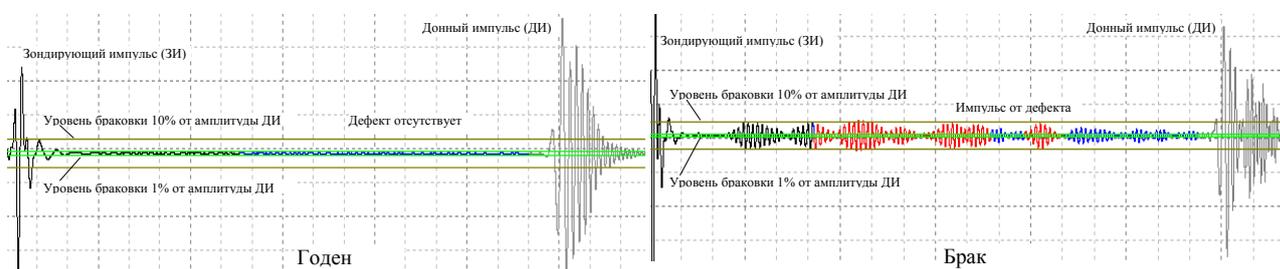


Рисунок 3 Дефектограммы годного и забракованного образцов при проведении контроля с помощью стержневой волны

На исследование представлены 360 образцов валов прутков-заготовок центробежных насосов с осевым отверстием, поступивших на предприятие ООО «Технология». Виды дефектограмм для годного и бракованного образцов при прозвучивании объекта стержневой волной представлены на рис. 3. По результатам контроля около 60% прутков-заготовок признаны бракованными. При уровне браковки 1% от амплитуды донного сигнала, коэффициенты отражения R по стержневой волне лежат в диапазоне от 1,5% до 22%, скорости крутильной волны C_T – в диапазоне от 3250 м/с (годные) до 3100 м/с (наиболее глубокие трещины, протяженные вдоль всего объекта). Наблюдается корреляция между низкими значениями скорости крутильной волны и высокими значениями коэффициентов отражения стержневой волны (например, для $R=5\%$ $C_T=3222$ м/с, для $R=11\%$ - $C_T=3177$ м/с соответственно).

ЛИТЕРАТУРА

1. Муравьева О. В., Муравьев В.В., Стрижак В.А, Мурашов С.А., Пряхин А.В. Акустический волноводный контроль линейно-протяженных объектов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017 – 234 с.

Исследование выполнено с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер 586308).

АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАСОСНЫХ ШТАНГ В ЗОНЕ ТЕРМОВЛИЯНИЯ

© 2021 г. Альбина Фаритовна Башарова^{1*}, О. В. Муравьева^{1,2*},

¹ – ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т.Калашиникова», 426069, Ижевск, Студенческая, 7

² – ФГБУН УдмФИЦ УрО РАН, 426067, Ижевск, ул. Татьяны Барамзиной, 34

* - pmkk@istu.ru

Насосные штанги, выполняющие функцию передачи движения плунжеру погружного глубинного насоса, являются одними из наиболее ответственных элементов всей глубинно – насосной установки, нуждающихся в непрерывном контроле на всех стадиях производственного цикла и в процессе использования. При этом наиболее опасные дефекты насосных штанг встречаются, как правило, в зоне термического влияния [1]. Наличие структурных неоднородностей в зоне термовлияния может стать источником дополнительной концентрации напряжений и привести к развитию дефектов в процессе эксплуатации глубинно-насосного оборудования. В качестве наиболее актуальных методов контроля пруткового проката, в частности насосных штанг, выделяют магнитный, вихретоковый и акустический методы. В качестве одного из вариантов контроля насосных штанг можно выделить волноводный метод, реализованный с использованием акустического дефектоскопа насосных штанг АДНШ [2]. Ограничением при использовании данного метода является наличие мертвой зоны длиной до 200 мм в зоне термовлияния вблизи галтельного перехода. Цель работы: изучение возможностей использования электромагнитно-акустического (ЭМА) зеркально-теневого метода на многократных отражениях для структуроскопии и дефектоскопии насосных штанг в зоне термического влияния [3].

Контроль насосных штанг проводился в области термовлияния (40 мм от подэлеаторного бурта протяженностью 150 мм). Метод реализован с использованием разъемных ЭМА-преобразователей поперечных волн осевой поляризации и продольных волн радиальных направлений по сечению прутка. В качестве информативных параметров использованы скорости поперечной C_t и продольной волн C_l и рассчитанный через их отношение коэффициент Пуассона ν . В местах измерений произведены замеры твердости металла. Необходимая точность определения скорости (2 м/с) обеспечивается высокой частотой дискретизации аналого-цифрового преобразования (100 МГц), получением серии многократных отражений и специальными методами обработки осциллограмм (метод интерполяции, фильтрации и корреляционного анализа). Причем прозвучивание образца в одном сечении с использованием продольных и поперечных волн позволяет определять коэффициент Пуассона вне зависимости от диаметра образца [3].

Результаты распределения скорости поперечной волны C_t , твердости НВ и коэффициента Пуассона ν по длине зоны термовлияния представлены на рис.1. Для всех исследованных зон термовлияния с каждой из сторон насосных штанг наблюдается уменьшение скорости с одновременным увеличением твердости с удалением от зоны высадки головки насосной штанги. Следует отметить, что в ряде случаев наблюдается более резкая и существенная неоднородность в распределении скорости по длине зоны термовлияния, что может говорить о неоднородности структурного состояния металла особенно вблизи подэлеваторного бурта. Имеет место увеличение коэффициента Пуассона от 0,283 до 0,286 при удалении от подэлеваторного бурта.

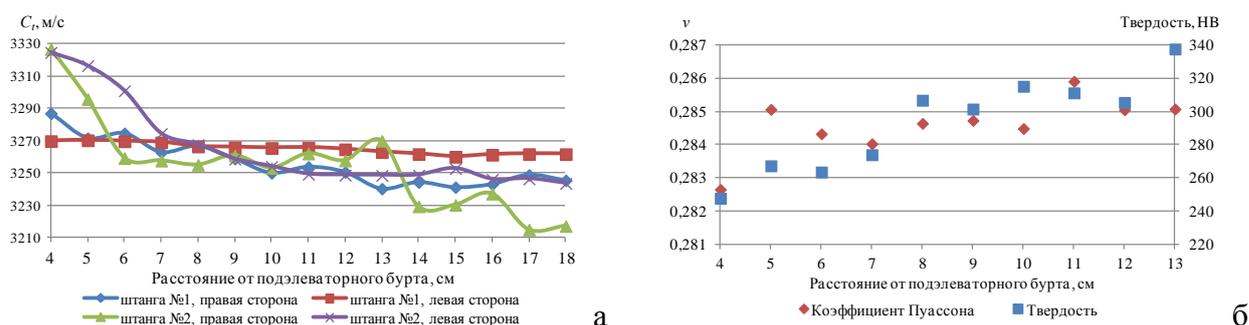


Рисунок 1 Распределение скорости поперечной волны (а), коэффициента Пуассона (б) и твердости по длине зоны термовлияния

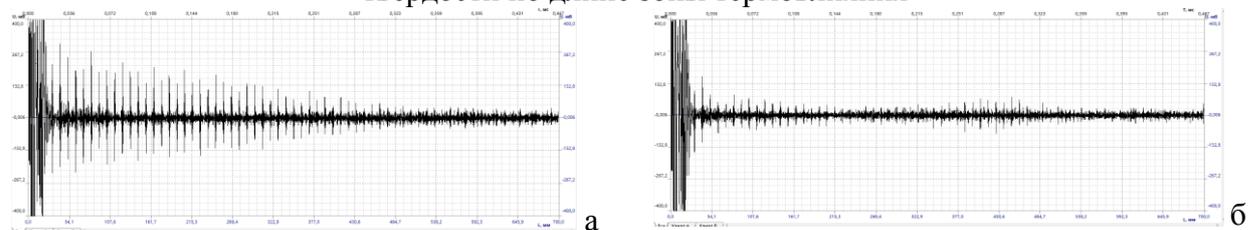


Рисунок 2 Сигнал, полученный при прозвучивании бездефектной зоны (а), зоны с дефектом (б)

Показана возможность использования предложенного метода для выявления ковочных трещин, переходящих из головки в зону термовлияния. На рис. 2 представлены серии импульсов многократных переотражений по диаметру штанги для бездефектного участка насосной штанги в зоне термовлияния и участка с дефектом.

Исследование выполнено с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер 586308).

ЛИТЕРАТУРА

1. Исаев А.А., Архипов К.И. Выявление факторов, снижающих работоспособность насосных штанг (на примере нефтяных компаний Республики) // Территория нефтегаз. – 2015. № 5. С. 46–52
2. Муравьева О.В., Стрижак В.А., Злобин Д.В., Мурашов С.А., Пряхин А.В., Мышкин Ю.В. Акустический волноводный контроль элементов глубиннонасосного оборудования // Нефтяное хозяйство. 2016. № 9. С. 110-115.
3. Муравьева О.В., Муравьев В.В., Башарова А.Ф., Синцов М.А., Богдан О.П. Влияние термической обработки и структурного состояния стали 40Х пруткового сортамента на скорость ультразвуковых волн и коэффициент Пуассона // Сталь. 2020. № 8. С. 63-68.

К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОХОДНОГО ЭМА-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН

© 2021 г. О.В. Муравьева^{1,2*}, Ю.В. Мышкин^{1*}, Александр Александрович Наговицын^{1*}

¹ – ФГБОУ ВО Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 426069 Ижевск, Студенческая, 7

² – ФГБУН УдмФИЦ УрО РАН, 426067 Ижевск, им. Татьяны Барамзиной, 34
[*pmkk@istu.ru](mailto:pmkk@istu.ru)

Возможности повышения эффективности электромагнитно-акустических (ЭМА)-преобразователей связаны, как правило, с увеличением поля внешнего подмагничивания, силы тока высокочастотного индуктора, оптимизации конструкции за счет минимизации зазоров. В случае ЭМА-преобразователя продольных волн появляется возможность повышения эффективности за счет дополнительного воздействия магнитным полем, создаваемым импульсным током индуктора. При этом принципиальным является направление действия тока, создающее синфазное или противофазное магнитное поле по отношению к внешнему полю подмагничивания.

Исследования влияния направления тока высокочастотного индуктора на эффективность ЭМА-преобразования проведены с использованием методов численного моделирования в программной среде Comsol Multyphysics согласно методике, представленной в работе [1]. Исследовались магнитные поля системы постоянных магнитов и поля вихревых токов проходного ЭМА-преобразователя продольных волн радиальных направлений по сечению стержня стали 40X с различными магнитными свойствами (после закалки и низкотемпературного 150⁰С и высокотемпературного 600⁰С отпуска). Импульс тока намагничивания представлен однополярным (положительным и отрицательным) импульсом с основной частотой в спектре 2,5 МГц, током в индукторе 30 А и количеством витков, равным 10.

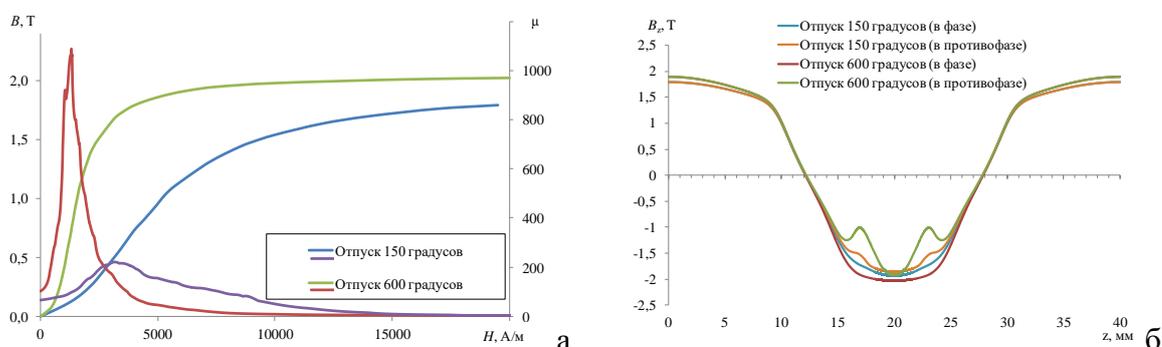


Рисунок 1 Кривые намагничивания и магнитной проницаемости для стали 40X с разной термообработкой (а), распределение осевой составляющей магнитной индукции по образующей прутка в момент достижения максимума тока намагничивания (б)

Результаты моделирования магнитного поля, формируемого системой постоянного намагничивания представлены на рисунке 1,б. Видно, что система доводит объект

практически до насыщения, при этом противофазное включение индуктора сохраняет распределение постоянного магнитного поля, а синфазное включение ведет к формированию существенной неоднородности по краям магнитной системы. На распределение плотности вихревых токов по глубине и вдоль оси в момент достижения максимума тока намагничивания (рис.2) существенно влияет как магнитные свойства стали, так и направление включения. Имеет место уменьшение скин-слоя при противофазном включении полей особенно в случае высокого отпуска, что является следствием действия силы на проводник с вихревым током в магнитном поле, смещающий его ближе к поверхности, тем самым увеличивая плотность тока. Имеют место краевые эффекты локального увеличения плотности тока, наиболее явно проявляющиеся для стали с высоким отпуском при встречном включении полей. Результаты моделирования показывают, что эффективность ЭМА-преобразования, определяемая произведением плотности вихревых токов и поля подмагничивания может существенно меняться для сталей с высокой магнитной проницаемостью при противофазном включении постоянного и переменного магнитных полей.

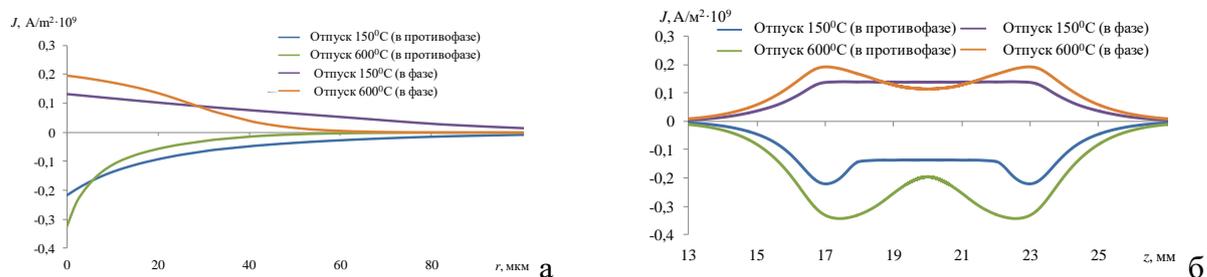


Рисунок 2 Распределение плотности вихревых токов по глубине (а), вдоль оси (б) в момент достижения максимума тока намагничивания (б)

Результаты моделирования подтверждены экспериментально с использованием зеркально-теневого метода многократных отражений [2]. Оценки амплитуд полученных сигналов при синфазном и противофазном подключении показывают, что для стали 40Х с после термообработки (закалка в масле, отпуск 570 °С, 1 час) амплитуда сигнала возросла на 29% (с 42 мВ при сонаправленном включении полей до 59 мВ при встречном включении полей); для стали после закалки и низкого отпуска (220 °С) амплитуда увеличилась на 9%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров К.В. Моделирование магнитных, электрических и акустических полей проходного преобразователя для контроля цилиндрических объектов / К.В. Петров, О.В. Муравьева, Ю.В Мышкин, А.Ф. Башарова // Дефектоскопия. – 2019. – № 2. – С. 16-24.
2. Стрижак, В.А. Аппаратно-программный комплекс контроля прутков зеркально-теневым методом на многократных отражениях / В.А. Стрижак, А.В. Пряхин, Р.Р. Хасанов и др. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. - 2017. - Т. 60. - № 6. - С. 565-571.

ПОВЫШЕНИЕ СТРУКТУРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ СТАЛЕЙ

© 2021 г. Сергей Григорьевич Сандомирский^{1*}

¹ – Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Академическая, 12

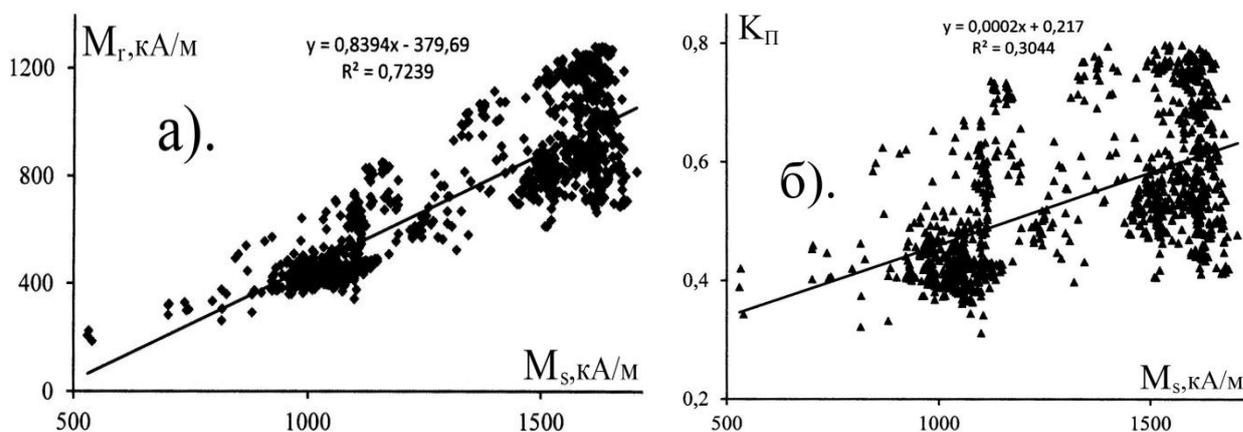
* - sand_work@mail.ru

В [1] показано, что все «специфические» изменения магнитных проницаемостей и релаксационных магнитных параметров сталей, связанные с изменениями их структурного состояния и фазового состава, обусловлены только происходящими при этом изменениями коэрцитивной силы H_c , остаточной намагниченности M_r и намагниченности M_s технического насыщения этих сталей. На основании этого для повышения достоверности магнитной структуроскопии предложено формировать ее информационные параметры из результатов измерения H_c , M_r и M_s сталей.

В докладе обоснован разработанный подход к формированию из остаточной намагниченности M_r сталей информационного параметра, обладающего более высокой чувствительностью к изменениям структуры сталей, происходящих при их термических обработках, простотой и точностью измерения.

Одной из причин ограниченного использования M_r сталей в магнитном структурном анализе, по мнению автора, является наблюдающаяся на практике зависимость M_r сталей не только от параметров структуры сталей, но и от их фазового состава. В обоснование этого воспользовались [2] результатами выполненных по стандартным методикам измерений M_r и M_s сталей 30, 45, 27СГ, 10ХСНД, 15ХН5МФ, 25Х1МФ, 30ХГСА, 30ХГСНА, 30ХМА, 38ХГН, 38ХМЮА, 38ХС, 40Х, 45Х, 40Х1НВА, 50ХНМ, 50ХН1М, 40Х10С2М(ЭИ107), ЭИ992(ХВ), ЭИ928, 12Х2Н4А, 12Х2Н4А цементированной, 18Х2Н4ВА, 18Х2Н4ВА цементированной, 18ХГТ, 30ХНЗА, 30ХМА, 60С2, 65Г, У7А, У10А, 95Х18 и 9ХГВ после разных режимов отпуска и закалки, а также отожженных углеродистых сталей. Всего для анализа использованы результаты измерения M_r и M_s 195 магнитотвердых сталей ($4 \text{ кА/м} \leq H_c \leq 7,79 \text{ кА/м}$) и 794 магнитомягких сталей ($0,071 \text{ кА/м} \leq H_c < 4 \text{ кА/м}$), в том числе 88 сталей с $0,071 \text{ кА/м} \leq H_c \leq 1 \text{ кА/м}$. По диапазону изменения свойств: $200 \text{ кА/м} \leq M_r \leq 1400 \text{ кА/м}$, $500 \text{ кА/м} \leq M_s \leq 1707 \text{ кА/м}$ и $71 \text{ А/м} \leq H_c \leq 7,43 \text{ кА/м}$ использованные для анализа материалы охватывают практически весь диапазон изменения магнитных свойств конструкционных сталей.

На рисунке а). представлено корреляционное поле связи между M_r и M_s исследованных сталей. Его статистический анализ показал, что коэффициент корреляции R между M_r и фазочувствительным параметром M_s исследованных сталей равен 0,85 (теснота связи между параметрами считается высокой, если $R \geq 0,7$).



На рисунке б). приведено корреляционное поле связи между $K_{П}$ и M_s тех же сталей. Его анализ показал, что коэффициент корреляции R между параметрами $K_{П}$ и M_s этих сталей равен 0,55. Это подтверждает существенно меньшую, по сравнению с параметром M_r , чувствительность параметра $K_{П}$ к изменениям фазового состава сталей. Значит, параметр $K_{П}$ больше, чем параметр M_r , чувствителен к изменениям структуры сталей.

Преимуществом использования параметра $K_{П}$ является и то, что параметр M_r по стандартным методикам может быть измерен с относительной погрешностью 3%, а отношение $K_{П} = M_r/M_s$ – с погрешностью 1% [3].

Обоснование эффективности использования параметра $K_{П}$ для магнитной структуроскопии в докладе проведено сопоставлением результатов контроля твердости HRC стали 40X в практически важном диапазоне $350^{\circ}\text{C} \leq T_0 \leq 550^{\circ}\text{C}$ изменения температуры T_0 ее отпуска после закалки с использованием $K_{П}$ и M_r . Получено, что параметры M_r и $K_{П}$ однозначно зависят от твердости HRC стали 40X в диапазоне ее изменения $37 \leq \text{HRC} \leq 48$. При этом параметр M_r изменяется в 5 раз больше диапазона максимально возможных отклонений его значений, связанных с погрешностью его измерения, а параметр $K_{П}$ – в 15,2 раза больше.

Результаты позволяют при разработке методов и приборов магнитной структуроскопии изделий из среднеуглеродистых сталей сосредоточить внимание на повышении точности измерения отношения $K_{П} = M_r/M_s$ материала изделий и отказаться от сложных и неточных измерений их релаксационных магнитных параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клюев В.В., Сандомирский С.Г. Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей. – М.: Издательский дом «СПЕКТР», 2017. – 248 с.

2. Sandomirski S.G., Kostin V.N., Vasilenko O.N. [и др.] About the Possibilities of Construction and Application of the Generalized Magnetic Parameters of Steel Hardometry after Hardening and Release // The VII International Young Researchers' Conference – Physics, Technology, Innovations (PTI-2020) AIP Conf. Proc. 2313, 030030-1–030030-6; <https://doi.org/10.1063/5.0032978>

3. Чернышев Е.Т., Чечурина Е.Н., Чернышева Н.Г., Студенцов Н.В. Магнитные измерения. М.: Издательство стандартов, 1969. – 248 с.

ОЦЕНКА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ СТАЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ

© 2020 г. Олег Иванович Манаев^{1*}, С.А. Пахомова^{1**}, И.Ю. Сапронов^{1***}

¹ – *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 107005 Москва, 2-я Бауманская ул., д.5*

* - dr.mgtu@yandex.ru ; ** - mgtu2013@yandex.ru; *** - ferum-2011@yandex.ru

В настоящее время кроме стандартных испытаний на растяжение для определения механических свойств сталей получили методы неразрушающего контроля. Один из таких методов - индентирование, основанное на вдавливании индентора в поверхность образца и позволяющее проводить экспресс-диагностику деталей без вывода из эксплуатации. Этот метод позволяет проводить контроль важных физико-механических характеристик, таких как твердость, вязкость разрушения и предел текучести. Однако метод не позволяет исследовать склонность сталей к трещинообразованию на поверхности образца. Для изучения процессов зарождения трещин возможно сочетание индентирования с другим методом неразрушающего контроля – методом, основанном на регистрации параметров акустической эмиссии. Последний благодаря высокой чувствительности позволяет фиксировать сигналы, вызванные изменениями строения стали в процессе деформации.

Исследование различными методами сопротивления разрушению сталей является важной задачей для повышения надежности деталей, в том числе пружин. В машиностроении для изготовления пружин применяют средне- и высокоуглеродистые стали различного легирования. В качестве упрочняющей термической обработки для повышения сопротивления малым пластическим деформациям возможно использование закалки со средним отпуском либо изотермической закалки [1, 2].

Целью настоящего исследования является повышение трещиностойкости пружинных сталей 65ГС и 60С2Н2А и определения рациональной технологии их термической обработки, путем применения методов неразрушающего контроля.

В рамках данной работы оценки сопротивления разрушению определяли критический коэффициент интенсивности напряжений K_c при испытаниях на внецентренное растяжение образцов с предварительно наведенной усталостной трещиной [3]. Использовали образец шириной $b = 26$ мм при фактической толщине листа (ленты) $h = 2,4$ мм. Удельную работу разрушения образцов с трещиной KCT , определяли на призматических ударных образцах с V-образным надрезом, заканчивающимся усталостной трещиной. Определяли также ударную вязкость образцов со стандартным надрезом KCU и удельную работу зарождения трещины $KC_3 = (KCU - KCT)$. Во всех случаях направление роста трещины при испытании было перпендикулярно направлению

проката листа. Испытывали 5 образцов на точку.

Состав сталей соответствовал ГОСТ 14959-79. Нагрев образцов под закалку и отпуск ($t = 280...470^{\circ}\text{C}$) проводили в камерной электрической печи, охлаждение в масле. Нагрев под изотермическую закалку выполняли в соляной ванне, а изотермическую выдержку – в щелочной, время выдержки $\tau = 15...20$ мин. Строение изломов исследовали на микроскопе МБС с увеличением до $\times 50$.

Диаграммы испытания на внецентренное разрушение образцов с трещиной, построенные в координатах «нагрузка — смещение берегов трещины», закаленных и отпущенных сталей (рис. 1, а) и изотермически обработанных сталей (рис. 1, б) имеют существенные отличия.

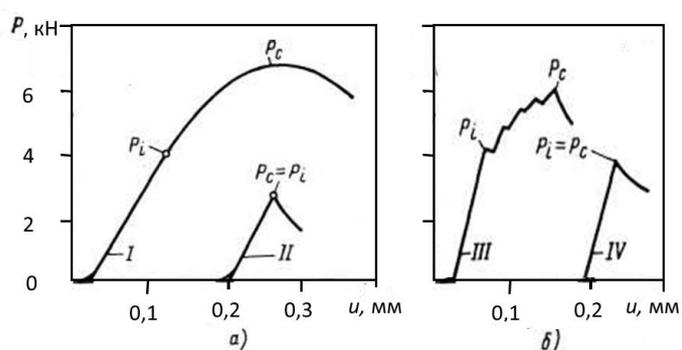


Рис. 1. Диаграммы разрушения при испытании образцов с трещиной: а — после закалки и отпуска на $\sigma_{\text{в}} = 1400$ МПа (I) и 2000 МПа (II); б — после изотермической закалки на $\sigma_{\text{в}} = 1400$ МПа (III) и 1700 МПа (IV)

В первом случае диаграмма (см. рис. 1, а) состоит из линейной части, характеризующей упругость материала и нелинейной. Во втором случае в нелинейной части кривая имеет пилообразный, зубчатый характер (см. рис. 1, б), что соответствует скачкообразному, прерывистому росту трещины. Каждый скачок сопровождается характерным акустическим эффектом — щелчком.

Заключение. Метод регистрации акустической эмиссии благодаря высокой чувствительности позволяет фиксировать сигналы, вызванные изменениями строения стали в процессе деформации. Трещиностойкость сталей зависит от технологии термической обработки, определяющей их фазовый состав. Установлен нелинейный, прерывистый и скачкообразный рост трещины в сталях со структурой нижнего бейнита. Диаграмма их разрушения имеет зубчатый участок, а излом - межкристаллитный тип. В стали со структурой троостита разрушение протекает монотонно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Готтштайн Г. Физико-химические основы материаловедения. М: БИНОМ. Лаборатория знаний. Пер. с англ. К.Н. Золотовой, 2009, 400 с.
2. Рахитадт А. Г. Пружинные стали и сплавы. М.: Металлургия, 1982, 400 с.
3. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Унификация методов расчетов и испытаний на прочность, ресурс и трещиностойкость. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2019, том 85, № 10, с. 47-54. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-10-47-54.

Пьезопреобразователь для мониторинга изменений состава жидких технологических сред

Коновалов Р.С.^{1,2}, Коновалов С.И.^{1*}, Павлов И.В.¹, Цаплев В.М.¹

*тел.:+7(812)234-37-26, E-mail: SIKonovalov.eut@gmail.com

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург

²Петербургский государственный университет путей сообщения, Санкт-Петербург

Суть обсуждаемой проблемы. В настоящее время трансформаторы получили широкое применение во многих электроэнергетических системах. Надежность работы систем электроснабжения зачастую зависит от качества используемых трансформаторов. В связи с этим встает вопрос о важности мониторинга рабочего состояния трансформаторов [1, 2]. При этом в силовых трансформаторах контролю прежде всего должно подвергаться состояние минерального масла, которое в них залито [3], поскольку именно от его качества зависит электроизоляция обмоток и качество охлаждения трансформатора. С течением времени под влиянием внешних окружающих факторов ряд физико-химических параметров масла может изменяться (цвет, вязкость, содержание воды). Среди диагностических методов исследования состояния трансформаторного масла можно назвать физико-химический анализ, анализ растворенных газов, оптический анализ, измерение степени полимеризации и др., краткий обзор которых представлен в [3]. Могут применяться также и акустические методы исследования, в основу которых часто закладывается связь параметров акустических волн (скорость распространения, затухание и др.) с параметрами окружающей среды [4, 5]. Данные методы подразумевают исследование смеси вода-масло вне зависимости от размера капель воды. В то же время, особенно на ранних стадиях попадания воды в масло, ее концентрация невелика, число капель воды незначительно и их размеры малы. Знание о начале такого нежелательного процесса является важной диагностической информацией. Установить наличие небольшого количества малых капель воды можно лишь применением акустических методов, подразумевающих использование коротких зондирующих сигналов. При этом в качестве излучателя возможно использование широкополосных пьезоэлектрических преобразователей, например, в виде тонкостенных сферических оболочек, колеблющихся на нулевой моде. Для получения наиболее короткого излучаемого сигнала возможно подключение к преобразователю электрической индуктивно-резистивной цепи [6].

Цель работы. Теоретическая проработка возможности излучения в масло коротких зондирующих сигналов с помощью сферического излучателя с подключенной к нему индуктивно-резистивной цепью,

Полученные результаты. Исследован импульсный режим работы излучателя описанного вида. Решение осуществлено применением аппарата схем-аналогов пьезоэлектрических преобразователей в сочетании со спектральным методом Фурье. Сигнал, возбуждающий сферический излучатель, принят в виде одного полупериода синусоидального напряжения на частоте ω_0 (ω_0 – частота ре-

зонанса). Длительность зондирующего сигнала определялась в соответствии с критерием (-20) дБ. На основании расчетного исследования изучены основные характеристики зондирующих сигналов, излучаемых сферой с различной относительной толщиной стенки α .

Расчет показал, что применение RL -цепи с корректно рассчитанными параметрами обеспечивает снижение длительности τ_n зондирующих импульсов при $\alpha \geq (0,06-0,07)$. При меньших значениях α положительное влияние подключаемой электрической нагрузки на длительность τ_n не выявлено.

Выводы. Показано, что правильный расчет параметров индуктивно-резистивной электрической цепи позволяет снизить длительность зондирующих импульсов. Для различных значений относительной толщины стенки сферического излучателя (при которых его еще можно считать тонкостенным) определены наилучшие значения параметров, характеризующих излучающую систему. Полученные данные позволили сделать сравнительные оценки основных параметров зондирующих сигналов (длительность и амплитуду) для случая применения корректирующей цепи и ее отсутствия. Полученные данные могут быть использованы при проектировании преобразователя, способного излучать сигналы малой длительности в среду, предназначенную для заполнения ею внутренней полости трансформатора.

Литература

1. Arvind, D., Khushdeep, S., Deepak, K. Condition monitoring of power transformer: A review. 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008, pp. 1–6. <https://0.1109/TDC.2008.4517046>
2. Castro, B., Clerice, G., Ramos, C., Andreoli, A., Baptista, F., Campos, F., Ulson, J. Partial Discharge Monitoring in Power Transformers Using Low-Cost Piezoelectric Sensors // Sensors 2016, 16(8), 1266. <https://doi.org/10.3390/s16081266>
3. Daniel R. de Luna, T.T.C. Palitó, Y.A.O. Assagra, R.A.P. Altafim, J.P. Carmo, R.A.C. Altafim, A.A.O. Carneiro and Vicente A. de Sousa, Jr. Ferroelectret-based Hydrophone Employed in Oil Identification—A Machine Learning Approach // Sensors, 2020, 20(10), 2979; <https://doi.org/10.3390/s20102979>
4. McClements, D., Fairley, P. Ultrasonic pulse echo reflectometer // Ultrasonics, 1991, 29, 58 – 62. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(91\)90174-7](https://doi.org/10.1016/0041-624X(91)90174-7)
5. Eggers, F., Kaatze, U. Broad-band ultrasonic measurement techniques for liquids // Measurement Science and Technology, 1996, Vol. 7, pp.1–19. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/7/1/001/pdf>
6. Коновалов С.И., Кузьменко А.Г. Нестационарный режим излучения тонкостенной пьезокерамической сферы с электрической корректирующей цепью // Акустич. журнал, 2010, т.56, №5, с.679-683. http://www.akzh.ru/pdf/2010_5_679-683.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ
МОЛОДЕЖНОЙ ШКОЛЫ

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ТЕРМОЭДС ОТ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕРМОИНТЕРФЕЙСА

Васильев И.М., Бейков М.В., Дементьев А.А.

АО «НПЦ «Полюс», Томск, Россия

E-mail vasiliev_ivan91@mail.ru

В современной технике повсеместно применяется термоинтерфейс, задача которого улучшить качество теплопереноса от греющегося элемента к радиатору охлаждения. Его неправильное нанесение, несоответствие реальной теплопроводности заявленной, а также низкое качество обработки поверхности радиатора и охлаждаемого элемента могут привести к снижению производительности, сокращению срока службы, ложному срабатыванию цепей защиты от перегрева и пр.

Существующие методы неразрушающего контроля не позволяют определить тепловое сопротивление «корпус–радиатор», а также исключить влияние других тепловых сопротивлений тепловой схемы исследуемого прибора. Одним из возможных методов является измерение термоЭДС между телами из разнородных металлов.

Цель данной работы – создание программы для определения термоЭДС, возникающей при передаче тепла между телами, соединенными через слой термоинтерфейса.

Авторами ранее разработана математическая модель передачи тепла, предполагающая протекание теплового потока через два алюминиевых цилиндра, соединенных между собой через слой термоинтерфейса в точке *B*, вызванного нагревом нижнего цилиндра (рис. 1).

При разработке математической модели были приняты следующие допущения: контакт между цилиндрами идеальный, коэффициенты теплопроводности веществ не зависят от температуры и являются постоянными, температура нагрева постоянна и равна 100 °С, а температура окружающей среды равна 25 °С. Тепловое сопротивление, возникающее в зоне контакта двух цилиндров, полностью определяется тепловым сопротивлением контактного слоя.



Рис. 1. Схематическое изображение математической модели

С целью исследования зависимости термоЭДС, возникающей при нагреве между разнородными металлами, от теплового сопротивления термоинтерфейса и параметров исследуемых тел, а также от температуры нагрева и окружающей среды создана программа, позволяющая пользователем в ходе работы изменять эти параметры и выводить график изменения термоЭДС с течением времени.

Программа реализована в среде QT. Интерфейс программы (рис. 2) интуитивно понятен, все поля ввода имеют собственное обозначение.

Для исследования влияния теплового сопротивления на термоЭДС рассмотрим следующий случай: материал нижнего цилиндра – алюминий, высота $L_1=7$ см; материал верхнего цилиндра – медь, высота $L_1=3$ см. Радиус обоих цилиндров равен 1 см. Изменяя толщину теплопроводящего слоя в пределах от 1 до 0,01 мм, получим значение возникающей термоЭДС для каждого случая (рис. 3).

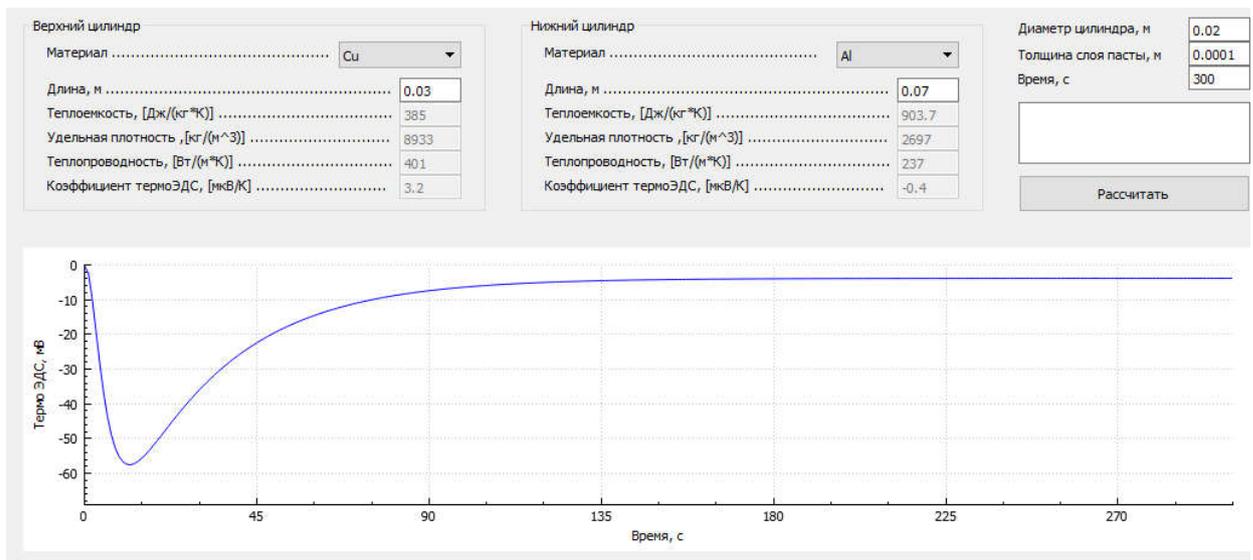


Рис. 2. Интерфейс программы

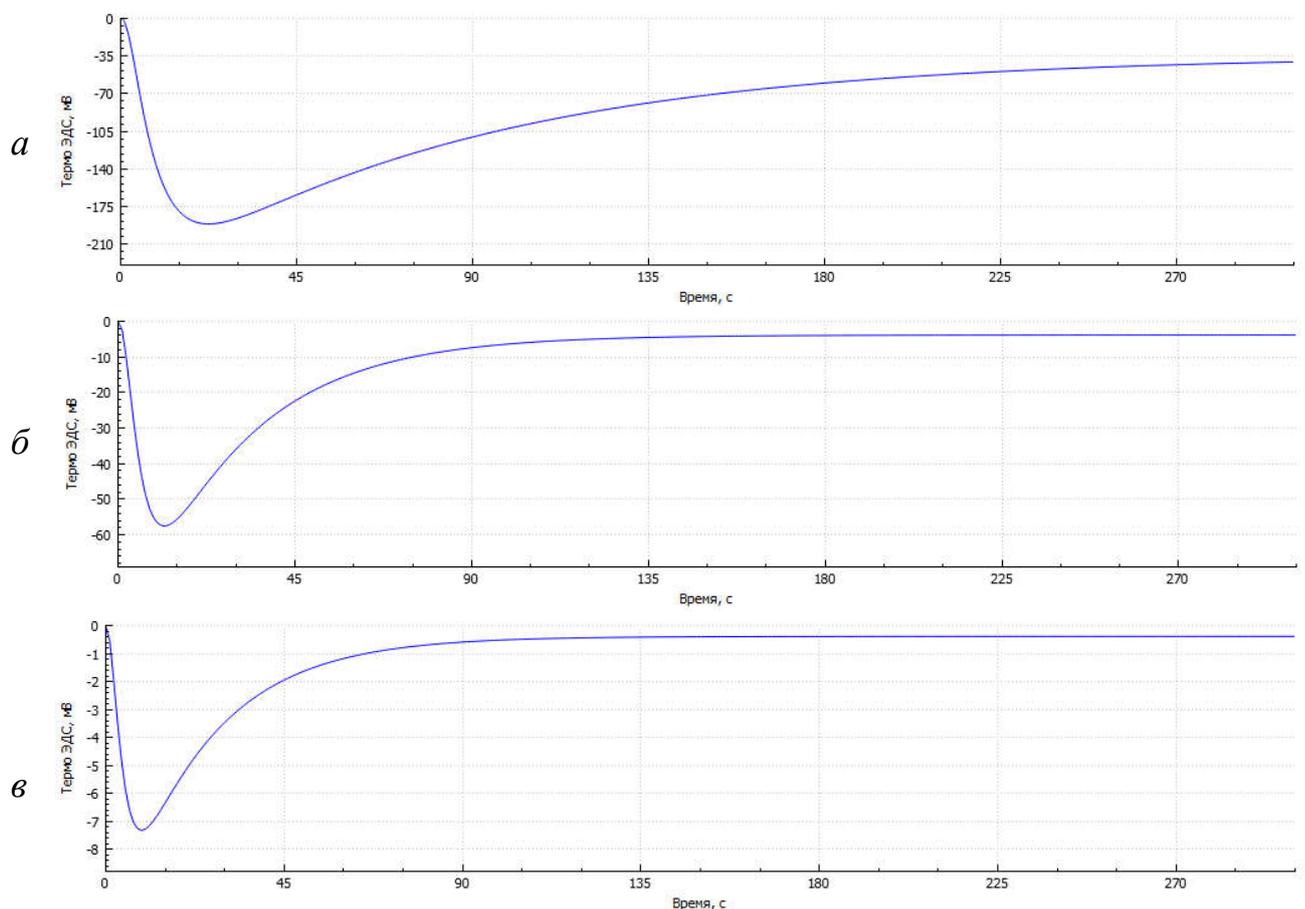


Рис. 3. ТермоЭДС при толщине термоинтерфейса:
а) 1 мм, б) 0,1 мм; в) 0,01 мм

В результате разработана программа, определяющая термоЭДС при передаче тепла между двумя разнородными металлическими телами. Показана зависимость возникающей термоЭДС от толщины слоя теплопроводящей пасты. Полученные данные могут быть использованы при работах по определению теплового сопротивления термоинтерфейса с помощью неразрушающего контроля.

КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫМ МЕТОДОМ

© 2020 г. Мусихин Алексей Сергеевич^{1*}

¹ – ФГУП "ВНИИМ им. Д.И.Менделеева", 190005, Санкт-Петербург
Московский пр., 19

* – musihinaleksei@mail.ru, +7-981-129-14-73

На сегодняшний день, для защиты металлических изделий от коррозии широкое применение нашли системы многослойных (в частности лакокрасочных) диэлектрических покрытий. При нарушении технологии нанесения, количество слоев покрытия может не соответствовать заявленному. Как правило, количество слоев системы покрытия определяется по конечной толщине покрытия приборами, осуществляющими дискретные измерения толщины в различных точках покрытия, а осуществление сплошного контроля толщины покрытия является нетривиальной технической задачей. В свою очередь, к большей части современных диэлектрических покрытий так же предъявляются требования к отсутствию дефектов сплошности на всей их поверхности. Одним из наиболее распространенных методов контроля сплошности покрытий является электроискровой метод неразрушающего контроля.

Современные методики выбора контрольного напряжения, отраженные в отечественных и зарубежных стандартах, позволяют выявлять только сквозные дефекты покрытий. При этом, методики не уделяют внимания связи пробивного напряжения с толщиной контролируемых покрытий и, как следствие, пробивному напряжению покрытий с недопустимо малой толщиной и несквозных дефектов покрытий.

Контрольное напряжение метода, по большей части, зависит от электрической прочности покрытия $E_{пр}$. В [1] была предложена зависимость для расчета электрической прочности $E_{пр}$ для широкого круга электроизоляционных материалов:

$$E_{пр} = K \cdot K_B \cdot (A_c^0)^{1.1} \cdot \exp\left(\frac{a}{b + \lg(b)} + \frac{m}{n + \lg(\tau)}\right),$$

где, K – коэффициент пропорциональности, зависящий от толщины d диэлектрика, τ – длительность воздействия приложенного напряжения, K_B – вероятность пробоя, A_c^0 – энергия каналаобразования, a , b , n , m – некоторые постоянные.

Возможность выявления недопустимых утонений и пузырей покрытия подтверждают данные эксперимента по определению пробивного напряжения лакокрасочного покрытия (ЛКП). В ходе эксперимента для нанесения покрытий использовалась эмаль ПФ-115, а в качестве подложки контрольного образца - лист фольгированного текстолита со слоем медной фольги толщиной 70 мкм. На различные области подложки было нанесено один, два и три слоя эмали (ЛКП). Определение

пробивного напряжения производилось на 11 участках каждого из одно-, двух- и трехслойных покрытий. Зависимость $U_{пр}$ от среднего значения h для исследованных областей покрытия приведена на рис. 1.

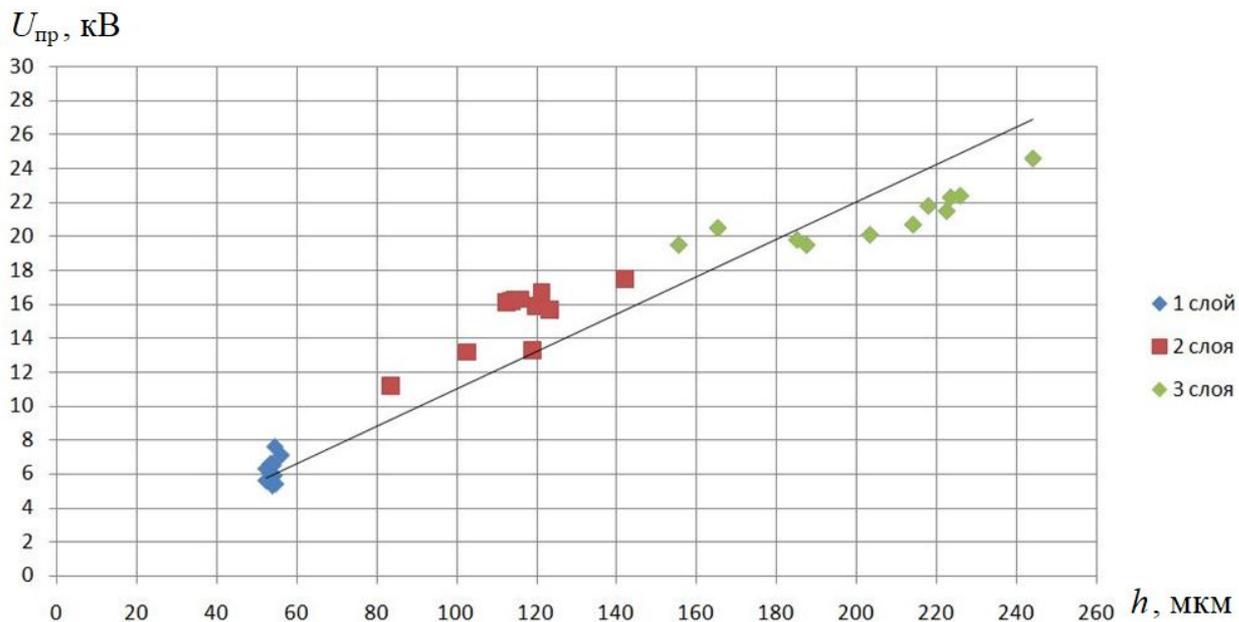


Рис. 1. Зависимость пробивного напряжения покрытия $U_{пр}$ от толщины покрытия h .

Из рис. 1 видно, что $U_{пр}$ квазилинейно возрастает с увеличением h в соответствии с $E_{пр}$ покрытия. Эксперимент показывает, что при выборе соответствующего расчетного или экспериментально определенного значения $U_{пр}$ возможно выявление участков покрытия с недопустимой минимальной толщиной (проведение допускового контроля) и пузырей покрытий.

Таким образом, результаты теоретического и экспериментального анализа электроискрового метода контроля диэлектрических покрытий показали, возможность расширение области его применения: не только контроля сплошности покрытий, но и выявление мест недопустимого утонения или пузырей покрытий, а также разработки методик расчета или экспериментального определения соответствующих значений импульсного контрольного напряжения, что, в отличие от электромагнитных методов контроля толщины, позволит проводить стопроцентный контроль сплошности и недопустимых утонений лакокрасочных и подобных им диэлектрических защитных покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вершинин Ю.Н.* Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2000. 260 с.

Особенности моделирования малогабаритных экранированных магнитоиндукционных преобразователей карандашного типа с использованием метода конечных элементов для толщиномеров покрытий.

¹Васильев А. Ю.

¹ ВНИИМ им. Д.И.Менделеева, Санкт-Петербург, Россия, vasilev.ay@bk.ru, +79818909442

Научный руководитель: Сясько В. А., д.т.н.

Особенностью современного промышленного производства является повышение спроса на малогабаритные магнитоиндукционные двухобмоточные трансформаторные преобразователи толщиномеров для контроля толщины токопроводящих неферромагнитных и диэлектрических покрытий на ферромагнитных основаниях или ферромагнитных покрытий на токопроводящих немагнитных или диэлектрических основаниях.

Измерение толщины покрытий малогабаритными преобразователями, в основном, на малоразмерных изделиях и в труднодоступных местах изделий сложной геометрической формы, что влечет за собой влияние двух мешающих параметров: краевого эффекта и угол наклона оси преобразователя относительно касательной к поверхности изделия (эффект качания). Эти мешающие параметры вносят разный вклад в систематическую погрешность результатов измерения, которую можно минимизировать оптимизацией, в том числе:

1. относительного расположения обмоток;
2. геометрических параметров обмоток (диаметры и высоты обмоток);
3. геометрических параметров ферромагнитного сердечника (диаметр, высота, радиус опорной поверхности);
4. геометрических характеристик внешнего экрана из ферромагнитных материалов (внешний диаметр и толщина стенки в зоне контроля);
5. высоты расположения обмотки возбуждения;

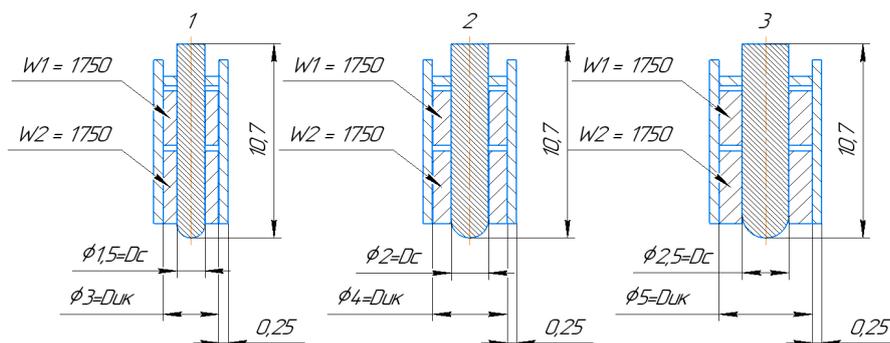
При этом должна обеспечиваться наибольшая чувствительность при минимально возможных габаритных размерах и минимальном диаметре зоны контроля.

Использование систем, реализующие метод конечных элементов (МКЭ), для задач оптимизации конструкции преобразователей требует понимания природы возникающих ошибок.

Как известно, реальная конструкция заменяется дискретной моделью элементов с конечным числом степеней свободы, а аппроксимация не дает точного описания распределения искомых величин в элементе, а лишь приближенное. Все результаты, полученные в данных системах, стоит считать приближенными к реальным. Вопросы о точности, устойчивости (определяемой выбором граничных условий, оптимальной разбивкой области на конечные элементы (КЭ) и пр.) и сходимости результатов (постепенном приближение значений к предельному), по мере уточнения параметров модели, полученных при использовании МКЭ, являются одними из основных.

При моделировании магнитоиндукционных преобразователей толщиномеров важно сгущать сетку КЭ в местах наибольшего градиента индукции поля и в области потоков рассеяния (опорная

поверхность сердечника, нижняя часть внешнего экрана, измерительная обмотка, часть объекта контроля непосредственно в зоне измерения). Однако, вместе с уменьшением размеров КЭ увеличивается время просчета модели. Эффективность уменьшения размера КЭ имеет свои пределы, после которого время просчета станет нерационально большим. Не менее эффективным оказалось использование способа усреднения результатов расчета модели, которые получаются путем многократного расчета системы при разных вариациях построения сетки модели. Однако, практика показала, что оценка достоверности модели возможна только при изготовлении макета чувствительного элемента магнитоиндукционного преобразователя. В докладе рассмотрено конструирование нескольких вариантов первичных измерительных преобразователей



карандашного типа (рис. 1) для ПАО ОДК «Сатурн».

Рис. 1. Конструкции моделируемых преобразователей

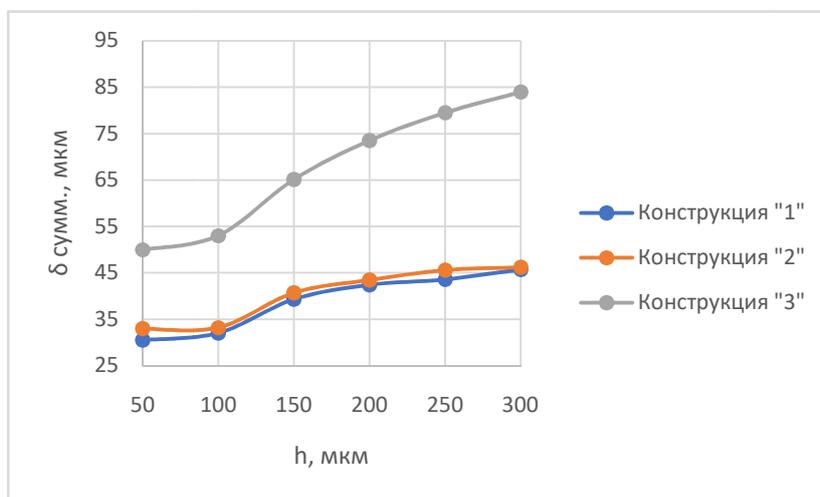


Рисунок 2. Зависимость суммарной погрешности измерения δ от толщины h для трех конструкций моделируемых преобразователей

Рассмотрен процесс их моделирования с использованием МКЭ, методик экспериментальных исследований при макетировании и результаты внедрения, что позволило накопить практический опыт контроля достоверности моделей (их верификации), оптимизация

которой является изначальной задачей, и методик проверки теоретических результатов оптимизации практическим путем.

МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ ФАЗОВОГО СОСТАВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ АУСТЕНИТНО-ФЕРРИТНЫХ И АУСТЕНИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ

© 2020 г. Александр Викторович Кочнев^{1*}, М. Б. Ригмант^{1**}, М. К. Корх^{1***}

¹ – ИФМ УрО РАН, 620108, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

* - kochnevav@imp.uran.ru; контактный телефон (343)378-36-10; научный руководитель – М.Б. Ригмант; ** - rigmant@imp.uran.ru; *** - korkhmk@imp.uran.ru

В настоящее время в отечественной и зарубежной промышленности широко применяются дуплексные стали, в которых содержание аустенита и феррита сравнимо друг с другом. Применяемые методы магнитного неразрушающего контроля не обеспечивают надёжный контроль содержания ферромагнитных фаз в диапазоне от 40 до 60% и не позволяют распознать, какая из ферромагнитных фаз присутствует в стали.

Цель данной работы – разработка метода неразрушающего контроля содержания ферромагнитных фаз (феррита или мартенсита) в изделиях из аустенитных сталей и сплавов с помощью датчиков приставного типа. Для достижения данной цели были проведены комплексные исследования магнитных параметров частных петель гистерезиса при различных амплитудах перемагничивающего поля, такие как коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, дифференциальная магнитная восприимчивость и другие.

Эксперименты проводились на аустенитно-ферритных и аустенитно-мартенситных образцах с различным фазовым составом (табл. 1 и 2). Мартенсит деформации был получен путём прокатки с разной степенью обжатия аустенитных образцов после их охлаждения в жидком азоте.

Таблица 1

Процентное содержание феррита в аустенитно-ферритных образцах

Номер набора образцов	Набор №1	Набор №2	Набор №3	Набор №4	Набор №5	Набор №6
Среднее $F, \%$	1,54	6,14	13,0	21,4	40,85	60,5

Таблица 2

Процентное содержание мартенсита в аустенитно-мартенситных образцах

№ образца	M1	M2	M3	M4
$M_{\%}, \%$	2,50	7,45	12,5	18

Частные петли гистерезиса были получены на установке Remagraph C-500. По этим петлям определялись различные магнитные характеристики, после чего проводилось установление их взаимосвязи с содержанием феррита или мартенсита. Анализ результатов показал, что максимумы дифференциальной магнитной восприимчивости χ_{Dmax}

практически одинаковы при различных амплитудах перемагничивающего поля для одного и того же фазового состава. Кроме того, значение этой величины однозначно связано с содержанием ферромагнитной фазы (рис.1).

На основании исследований был сконструирован макет прибора, в котором датчиком являлся приставной электромагнит с дифференциальной катушкой.

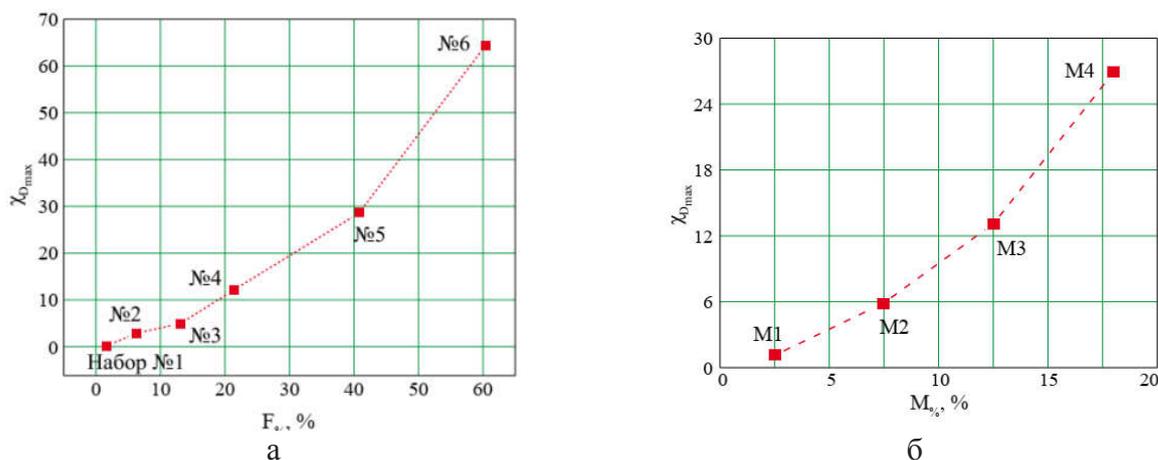


Рисунок 1. Зависимости максимальной дифференциальной магнитной восприимчивости χ_{Dmax} от содержания а) ферритной фазы F ; б) мартенситной фазы M

По итогам работы были установлены корреляционные связи фазового состава и исследуемых магнитных параметров. Величина максимума дифференциальной магнитной восприимчивости может служить достоверной характеристикой магнитного контроля фазового состава аустенитно-ферритных и аустенитно-мартенситных сталей. Она однозначно связана с процентным содержанием фазовых составляющих независимо от амплитуды перемагничивающего поля. Кроме того, был изготовлен макет прибора с датчиком приставного типа, позволяющий проводить определение фазового состава при перемагничивании в средних магнитных полях амплитудой 250 – 600 А/см.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rigmant M.B., Kochnev A.V., Korkh M.K., Sazhina E.Yu. Assessment of phase composition of corrosion-resistant chromo-nickel steels by magnetic properties // AIP Conference Proceedings. 2019. V. 2174. P. 20052 (6 pp.)
2. Корх М.К., Ригмант М.Б., Сажина Е.Ю., Кочнев А.В. Измерение содержания ферромагнитной фазы по магнитным свойствам в двухфазных хромоникелевых сталях// Дефектоскопия. 2019. № 11. С. 32—44.
3. Korkh M.K., Rigmant M.B., Sazhina E.Yu., Kochnev A.V. Measuring Ferromagnetic Phase Content Based on Magnetic Properties in Two-Phase Chromium–Nickel Steels // Russian journal of nondestructive testing. 2019. V. 55. №11. P. 837—850.
4. Ригмант М.Б., Корх М.К. Контроль фазового состава и магнитных свойств изделий ответственного назначения из аустенитно-ферритных и аустенитно-мартенситных сталей // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 3. С. 45—53.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕТЕЛЬ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ В КАЧЕСТВЕ КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ ИХ КОРРОЗИОННОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ

© 2020 г. Роман Александрович Соколов^{1*}, В. Ф. Новиков^{1**}, К. Р. Муратов^{1***}

¹ – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», 625000 г. Тюмень, ул. Володарского, 38

* - falcon.rs@mail.ru; ** - vitaly.nowikov2017@yandex.ru; *** - muratows@mail.ru

Существует большое разнообразие методов [1], позволяющих определять вид коррозии, степень ее опасности, скорость протекания, влияние внешних и внутренних факторов [2-4]. В современной методологии исследования коррозии известны как разрушающие, так и неразрушающие методы, позволяющие определить ее основные параметры, например: гравиметрический метод, метод измерения электрохимического потенциала и др.

В настоящей работе была поставлена цель проанализировать возможность применения петель магнитного гистерезиса в качестве диагностического параметра для определения скорости коррозионного разрушения конструкционных сталей.

Образцы, изготовленные из сталей 09Г2С, Ст3, 15ХСНД были термообработаны для получения различной структуры и фазового состава. Закаленные образцы были отпущены в течении 1 часа с охлаждением на воздухе при температурах: 200, 350, 500, 650 °С.

Коррозионные испытания сталей проводились в лабораторных условиях. В качестве агрессивной среды использовалась морская вода с содержанием соли 34 г на литр. Образцы не находились в прямом контакте друг с другом.

Существует множество исследований, в которых в качестве универсального параметра контроля различных характеристик стали (твердости, предела упругости, предела прочности, пластичности) а также напряженно- деформированного состояния, используется коэрцитивная сила [2]. Однако использование коэрцитивной силы в качестве универсального параметра для контроля скорости коррозии конструкционных сталей не всегда может быть применима ввиду однозначной зависимости между коэрцитивной силой и скоростью коррозии.

По большому счету определение скорости коррозии с использованием магнитных характеристик может быть сведено к задачам технической диагностики [5]. Для этого необходимо произвести определение различных магнитных характеристик стали [7]. Значения B_r , H_g также, как и коэрцитивная силы удовлетворительно коррелирует со скоростью коррозии. Однако применение многопараметрового анализа путем перебора

различных комбинаций магнитных параметров выявило улучшенную корреляцию комплексного параметра $P = \frac{(H_c + H_r)}{(H_r - B_r)}$ со скоростью коррозии (рисунок 1).

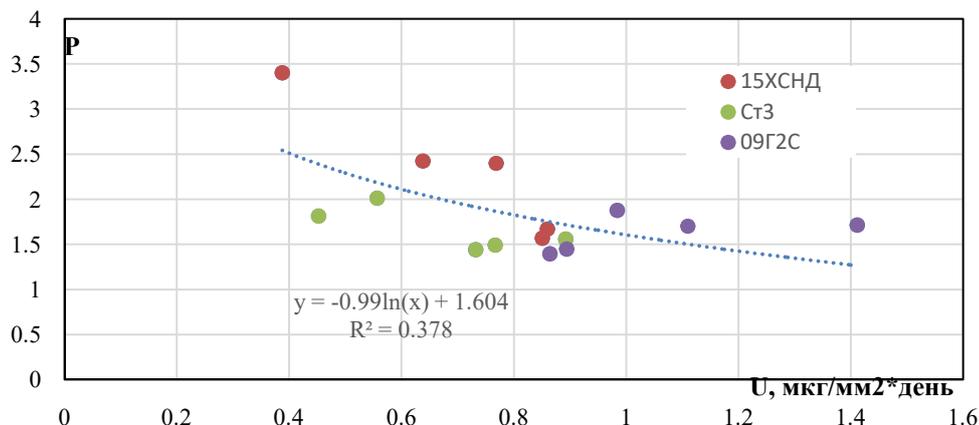


Рис. 1. Зависимость комплексного параметра P от скорости коррозии образцов изготовленных из стали 09Г2С, Ст3, 15ХНСД в морской воде.

Как можно заметить из рисунка 1, комплексный параметр P имеет удовлетворительную корреляцию со скоростью коррозии. Регрессионная кривая описывается с помощью логарифмической функции. Однако стоит отметить, что в силу отсутствия статистической информации о скорости коррозии исследуемых сталей в морской воде, к предлагаемой гипотезе необходимо относиться с осторожностью. И ответить на вопрос о достоверности приводимых в работе данных возможно утвердительно лишь выполнив дополнительный комплекс исследований. Однако мы не умаляем результат и считаем его ценным, поскольку сама по себе рассмотренная закономерность является не изученной и не объясненной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малахов А.И., Жуков А.П. Основы материаловедения и теория коррозии. М. Высш. школа: 1989, - 516 с.
2. Щербинин В.Е., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1996. 266 с.
3. Atul Tiwari, Lloyd Hihara, James Rawlins Intelligent Coatings for Corrosion Control. - Butterworth-Heinemann, 2014. – P. 746. – ISBN: 9780124114678.
4. Nalli K. Corrosion and its mitigation in the oil and gas industry. An overview. - PM-Pipeliners Report, 2010. pp. 10–16.
5. Бургер И.А. Техническая диагностика. – М.: «Машиностроение», 1978. – 240 с.
6. Коллакот Р.А. Диагностика повреждений. – М.: Мир, 1989. - 512 с.
7. Новиков В.Ф., Нерадовский Д.Ф., Соколов Р.А. Использование квазистатических петель магнитного гистерезиса для контроля структуры стали // Вестник ПНИПУ. Сер. «Машиностроение, материаловедение». – 2016. – Т. 18, № 2. - С.38-50. – doi: 10/15593/2224-9877/2016.2.03.

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННОЙ СТАЛИ У8 ПО МАГНИТНЫМ ПАРАМЕТРАМ

© 2020 г. Щапова Елизавета Андреевна^{1*}, А. Н. Сташков^{1**}, Г. В. Щапов^{2***},
С. В. Афанасьев¹, А. П. Ничипурук¹

¹ – Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, 620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

² – Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19

* - schapova@imp.uran.ru; ** - stashkov@imp.uran.ru; *** - hg-1994@mail.ru

Эвтектоидная углеродистая сталь У8 широко применяется для изготовления инструментов. Известно, что в зависимости от технологических операций [1,2] в структуре стали У8 может присутствовать как пластинчатый, так и глобулярный перлит. От морфологии перлита зависят прочностные и пластические свойства стальных изделий [3]. В процессе изготовления и эксплуатации в них могут возникать остаточные механические напряжения, приводящие к сокращению ресурса и преждевременному выходу из строя детали или всей конструкции. Вопрос оценки напряжений является важным и актуальным. Одними из наиболее чувствительных неразрушающих методов контроля напряжений в ферромагнитных изделиях являются магнитные. В работе [4] была предложена методика, позволяющая проводить оценку остаточных сжимающих напряжений в низкоуглеродистых сталях. Задача данной работы заключалась в оценке остаточных механических напряжений в пластически деформированной углеродистой стали У8 с различной морфологией перлита по магнитным параметрам.

Исследования проводились на образцах из стали У8 со структурой пластинчатого и глобулярного перлита. Образцы представляли собой параллелепипеды длиной 250 мм и сечением 2x8 мм². Эксперимент заключался в последовательной пластической деформации растяжением испытуемых образцов с измерением магнитных свойств, в том числе обратимой магнитной проницаемости после каждой ступени деформационного воздействия. Измерения магнитных свойств проводили на магнитометрической установке REMAGRAPH C-500, а также на уникальной магнитометрической установке [5].

Результаты исследования показали, что для глобулярного и пластинчатого перлита наблюдаются одинаковые тенденции изменения магнитных свойств. Не смотря на некоторые различия в значениях максимальной магнитной проницаемости μ_{\max} и остаточной индукции B_r у недеформированных образцов, при относительных удлинениях образцов 4% и более эти свойства становятся практически одинаковыми независимо от формы перлита. Коэрцитивная сила H_c для образцов с пластинчатым перлитом меньше, чем для образцов с глобулярным перлитом. При деформации коэрцитивная сила

значительно возрастает до относительного удлинения 2 %, далее следует небольшой рост H_c вплоть до разрыва образцов.

Кроме параметров петли гистерезиса были проанализированы полевые зависимости обратимой магнитной проницаемости [5]. Средние поля смещения 90-градусных доменных границ были определены для каждого удлинения образцов и определены остаточные механические напряжения (рис. 1).

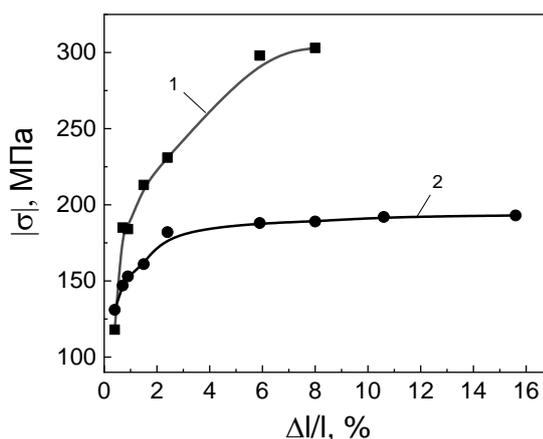


Рис. 1. График зависимости остаточных механических напряжений от относительного удлинения для стали У8: кривая 1 – образец со структурой пластинчатого перлита, кривая 2 – образец со структурой глобулярного перлита

В результате работы было установлено, что остаточные механические напряжения в образцах стали У8 различаются в зависимости от формы перлита. Разница в напряжениях тем больше, чем больше деформация образцов (рис. 1).

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», №АААА-А18-118020690196-3) при финансовой поддержке РФФИ (проекты №20-32-90139 и №20-58-00015 Бел_а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Счастливец В.М., Мирзаев Д.А., Яковлева И.Л., Окишев К.Ю., Табатчикова Т.И., Хлебникова Ю.В. Перлит в углеродистых сталях. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 310 С.
2. Wu T., Wang M., Gao Y., Li X., Zhao Y., Zou Q. Effects of Plastic Warm Deformation on Cementite Spheroidization of a Eutectoid Steel// Journal of iron and steel research, International. 2012. V.19. No. 8. P. 60-66.
3. Toribio J. Relationship between microstructure and strength in eutectoid steels// Materials Science and Engineering A. 2004. V. 387. P. 227-230.
4. Ничипурук А.П., Сташков А.Н., Кулеев В.Г., Щанова Е.А., Осипов А.А. Методика и устройство для безградуировочного определения величины остаточных сжимающих напряжений в деформированных растяжением низкоуглеродистых сталях// Дефектоскопия. 20117. №11. С. 20-27.
5. Stashkov A.N., Kuleev V.G., Schapova E.A., Nichipuruk A.P. Studying Field Dependence of Reversible Magnetic Permeability in Plastically Deformed Low-Carbon Steels// Russian journal of nondestructive testing. 2018. No. 54. P. 855-861.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИЛОЖЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛА СИЛОВОЙ ОБОЛОЧКИ, ВЫПОЛНЕННОЙ ИЗ СТАЛИ 20К

© 2020 г. Крючева Кристина Денисовна¹, Путилова Е.А.^{1*}, Задворкин С.М.¹,
Мушников А.Н.¹, Мусохранов В.В.²

¹ – ИМАШ УрО РАН, Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34

² – ВГУП «ЦАГИ», Московская область, г. Жуковский, ул. Жуковского, 1

* - tuevaevgenya@mail.ru

Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) деталей и элементов конструкций из металлических материалов после некоторого срока эксплуатации остается важной и актуальной задачей, над решением которой работают специалисты различных областей. С точки зрения возможностей применения именно магнитных неразрушающих методов диагностики, работы по изучению влияния упруго- и упругопластического деформирования на поведение магнитных характеристик активно ведутся учеными как из России, так и за рубежом. Однако каждый конкретный случай, в особенности, если это касается объектов ответственного назначения, требует отдельного детального изучения.

Цель работы - определить возможности магнитных методов неразрушающего контроля применительно к оценке напряженно-деформированного состояния элементов силовой оболочки, работающей под давлением.

В докладе представлены результаты по исследованию влияния предварительной пластической деформации одноосным растяжением на изменение магнитных характеристик котельной стали 20К, из которой изготовлен сосуд, работающий под давлением, общим объемом порядка несколько тысяч м³, и находящегося в эксплуатации около 50 лет, под действием упругопластических деформаций.

Влияние упругой деформации одноосным растяжением на магнитные характеристики стали 20К исследовали на образцах, как в исходном состоянии, так и после предварительной пластической деформации с остаточным удлинением $\varepsilon_{ост} = 0,16, 0,20, 0,31, 0,45, 0,53, 0,54, 0,70, 1,06, 1,45, 1,89, 2,85, 3,90$ %. Выбор схемы деформирования растяжением обусловлен тем, что на оболочку сосудов, работающих под давлением, действуют в основном растягивающие напряжения. Эксперименты проводили на испытательной машины Tinius Olsen Super L60, оснащенной магнитноизмерительными системами. Магнитные измерения проводили в замкнутой магнитной цепи, по схеме пермеметра, с помощью магнитноизмерительного комплекса REMAGRAPH C-500, а также с помощью приставных магнитных устройств, учитывающих геометрию образцов и обеспечивающих достаточную глубину промагничивания.

По результатам выполненных исследований подобраны аналитические выражения, описывающие экспериментальные зависимости коэрцитивной силы (измеренной в условиях замкнутой магнитной цепи, а также с помощью приставных магнитных устройств), остаточной индукции и максимальной магнитной проницаемости с коэффициентами детерминации не менее 0,95 в случае промагничивания всей толщины исследуемых образцов.

Установлено, что при величине остаточной деформации более 0,3 % наблюдается высокая чувствительность коэрцитивной силы исследованных образцов к этому параметру, а, соответственно, и к уровню остаточных напряжений: с увеличением остаточной деформации от 0,3 % до 3,9 % коэрцитивная сила возрастает более чем в три

раза. Показано, что магнитные характеристики металла темплетов, бывших в эксплуатации и предоставленных для исследований, соответствуют образцам, деформированным на остаточную деформацию около 0,56 %. Тем самым показана принципиальная возможность оценки исходного уровня (без избыточного давления в конструкции) НДС элементов исследованной силовой оболочки по измерениям коэрцитивной силы с помощью приставных магнитных устройств.

Показана возможность оценки напряжений растяжения в изделиях из исследованной стали 20К в интервале от 0 до 150...200 МПа, в случае если исходное, до приложения растягивающей нагрузки, НДС изделий соответствует остаточной деформации 0,54 % и более.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 20-79-00045).

АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТОЛСТОСТЕННЫХ ТРУБ

к.т.н. Быченко В.А.¹, к.т.н. Беркутов И.В.¹, Алифанова Ирина Евгеньевна.²

1 – ООО «НТЦ «Эталон», 2 – НИУ ИТМО,

г. Санкт-Петербург, Россия

sherbairina@mail.ru, тел.: +7 904 556 4072

Введение

В настоящее время при производстве новых образцов техники постоянно повышаются требования к эксплуатационным характеристикам изделий. При этом, первостепенной задачей остается обеспечение эксплуатационной надежности, точности изготовления и требований ресурса конструкций. В частности, к производству толстостенных труб предъявляются высокие требования сохранения геометрических характеристик: прямолинейности и разностенности. Толстостенные трубы представляют собой тела трубчатой формы переменного сечения с внешним диаметром 0,2 – 0,3 м при длине более 5 м, изготовленные из специальной стали.

Во многом сохранение геометрических характеристик изделия при производстве определяется уровнем механических напряжений, которые практически невозможно учесть в проектировочных расчетах. Прямые измерения механических напряжений и определение качества изготовления могут быть эффективно использованы как для проверки правильности таких расчетов и технологии изготовления изделий, так и для оперативной диагностики их технического состояния при эксплуатации и корректировке процесса производства при изготовлении.

Методы контроля механических напряжений

Анализ существующих средств контроля механических напряжений продемонстрировал неприменимость большинства методов в решении задачи контроля механических напряжений в толстостенных трубах ввиду следующих факторов:

- отсутствие аппарата вычисления остаточных напряжений (в данный момент реализуются вычисления в условных единицах, например, в магнитных величинах и др.);
- невозможности выполнять измерения на реальных объектах (например, выполнить измерения внутренних остаточных напряжений с помощью нейтронного ускорителя можно лишь на образцах с определенными требованиями к размеру);
- измерение напряжений 3-го рода, что не характеризует напряженно-деформированное состояние (НДС) в объеме, позволяющем оценить вероятность деформации объекта контроля при механической обработке.

Для контроля механических напряжений в толстостенных трубах было предложено использовать следующие методы:

- ультразвуковой метод с генерацией двух взаимно-поляризованных поперечных и одной продольной ультразвуковых волн [1, 2], позволяющий контролировать двухосное напряженное состояние интегрально по толщине прозвучиваемого изделия;
- лазерно-ультразвуковой метод с генерацией головной подповерхностной волны [3, 4], позволяющий контролировать одноосное напряженное состояние в подповерхностном слое на базе 30 мм.

Для контроля механических напряжений в толстостенных трубах ультразвуковым методом использовался двухканальный ультразвуковой дефектоскоп в комплекте с трехкомпонентным пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭП), объединяющем в своем корпусе три пьезоэлемента и позволяющем генерировать и принимать две взаимно-поляризованные поперечные и продольную ультразвуковые волны, распространяющиеся по толщине прозвучиваемого объекта. Комплект средств ультразвукового контроля обладает компактностью, гибкостью программного обеспечения и позволяет оценивать амплитудные, временные и частотные характеристики принимаемых сигналов.

Для контроля механических напряжений в толстостенных трубах лазерно-ультразвуковым методом использовался лазерно-ультразвуковой дефектоскоп, разработанный в Международном лазерном центре МГУ им. М. В. Ломоносова в комплекте раздельно-совмещенным оптико-акустическим преобразователем (ОАП) с базой измерений 30 мм.

Преимущества лазерно-ультразвукового метода контроля заключаются в следующем:

- лазерное возбуждение позволяет генерировать мощные и короткие аперриодические УЗ-сигналы, использование которых позволяет проводить измерения с высоким временным разрешением;

-благодаря широкополосности и малой длительности (70 – 80 нс) термооптически возбуждаемых акустических импульсов, достигается наибольшая точность измерения скорости ультразвука (относительная погрешность не более 1%, повторяемость 1-2 м/с).

Основные результаты

Наибольшее внимание для минимизации погрешностей следует уделять оценки значения коэффициента упругоакустической связи материала. С этой целью была проведена градуировка средств контроля с использованием образцов-имитаторов. С целью обеспечения максимально возможного соответствия физико-механических и акустических свойств образцов-имитаторов материалу толстостенных труб, образцы-имитаторы для градуировки средств контроля были изготовлены из заготовки специальной трубы, прошедшей точно такие же операции механической и термической обработки, что и объекты контроля.

Апробация методов контроля механических напряжений выполнялась на экспериментальных образцах кольцеобразной формы (внешний диаметр – 270 мм, толщина – 80 мм), изготовленных из толстостенных труб. Экспериментальные исследования по апробации методов контроля механических напряжений проводились с использованием универсальной разрывной машины EU-40. С помощью предложенных средств контроля проводились измерения механических напряжений в экспериментальных образцах под действием сжимающей нагрузки 135, 275 и 325 кН. Для проверки результатов контроля было выполнено конечно-элементное моделирование нагружения экспериментальных образцов, результаты которого показали качественную и количественную сходимость с результатами эксперимента.

Экспериментальные исследования по контролю механических напряжений в толстостенных трубах с помощью предложенных методов контроля проводились на разных этапах технологического процесса четырех толстостенных труб, изготовленных по разным технологиям производства. Была проведена верификация результатов экспериментальных исследований с помощью расчетных методов.

Обсуждение результатов

Таким образом, были проведены экспериментальные исследования по контролю механических напряжений в толстостенных трубах с помощью ультразвукового и лазерно-ультразвукового методов, включая: верификацию методов в процессе испытаний на сжатие экспериментальных кольцеобразных образцов; контроль механических напряжений в толстостенной трубе на разных этапах механической обработки; контроль механических напряжений в четырех толстостенных трубах, изготовленных по различным технологиям.

Результаты исследований подтвердили возможность оценки уровня механических напряжений в толстостенной трубе, равномерность распределения напряжений и физико-механических свойств по сечению, длине и по поверхности толстостенной трубы, а также сравнивать качество толстостенных труб и технологических процессов их изготовления.

Акустические методы контроля механических напряжений, внедренные в процесс производства толстостенных труб, позволят определить недопустимый уровень механических напряжений еще в заготовках толстостенных труб, планировать технологический процесс с учетом известных механических напряжений, и, в конечном итоге, повысить качество толстостенных труб в части обеспечения выполнения требований к их прямолинейности и разностенности.

Литература

1. Н.Е. Никитина. Акустоупругость. Опыт практического применения. / Н.Новгород: ТАЛАН, 2005.-208с.
2. ГОСТ Р 52731-2007. Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля механических напряжений. Общие требования: нац. Стандарт РФ – Введ. 01.10.2007
3. Быченко, В.А. Контроль остаточных напряжений в околошовной зоне сварного шва. / [В.А. Быченко, И.В. Беркутов, А.Л. Майоров, А.В. Ильин, В.В. Киреев, В.Е. Прохорович, М.А. Чекмарева] // В мире НК – 2007 - № 13 – С.50-53.
4. Karabutov, A.A. Determination of uniaxial stresses in steel structures by the laser-ultrasonic method / [A.A. Karabutov, N.B. Podymova, E.B. Cherepetskaya] // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics – M A I K Nauka – Interperiodica (Russian Federation), 2017. – Vol.58, No.3 – pp. 503-810. – UDC 534.212; 534.08.
5. Свидетельство об аттестации методики (метода) измерений №30/23.11.2018-01.00276-2014 «Методика измерений механических напряжений в металлических конструкциях лазерно-ультразвуковым методом».

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ГОЛОВНОЙ ВОЛНЫ В ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ РЕЛЬСАХ

© 2020 г. Сергей Владиславович Казанцев*

– *Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
Россия 426069 Ижевск, ул. Студенческая, 7*

*Научный руководитель д.т.н., проф. В. В. Муравьев***

**E-mail: sergokazancev@mail.ru; **E-mail: pmkk@istu.ru*

ВВЕДЕНИЕ

Звеньевой путь в современном мире уступает место бесстыковому. Отсутствие стыков рельсов делает движение локомотивов менее шумным, снижает износ колес вагонных пар, позволяет снизить затраты на содержание рельсов, на материалы, и на тяговое усилие поездов. Но использование бесстыкового пути приводит к возникновению более высоких температурных напряжений в рельсах.

Для контроля напряженного состояния рельсов все чаще применяется анализ распространения головной волны [1]. В работе [2] отмечается более высокая чувствительность головной волны к одноосному напряжению по сравнению с поперечной.

С целью исследования распространения головных волн в области сварных соединений и дефектов рельсов выполнен эксперимент по возбуждению головных волн в рельсовой плети дефектами типа «смятие и вертикальный износ» и сварными стыками.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В ходе исследования были получены сигналы головной волны, возбуждаемой с помощью ультразвукового дефектоскопа DIO1000 PA и специально разработанного П-образного раздельно-совмещенного ультразвукового преобразователя головной волны с резонансной частотой 2,5 МГц в участках рельсовой плети [3].

Скорость головной волны вычислялась с помощью измерения разности временной задержки волны в стандартном образце СО-2 и в рельсе по формуле:

$$C_{ГОЛ} = \frac{b}{(b/C_{СО-2} - \Delta t)} \quad (1)$$

где $C_{ГОЛ}$ – скорость головной волны в образце, b – база прозвучивания преобразователя, $C_{СО-2}$ – скорость распространения головной волны в стандартном образце СО-2, Δt – разность времени пробега головной волны в рельсе и в СО-2.

Скорость головной волны в СО-2 принята за 5900 м/с, база прозвучивания преобразователя – 72 мм. Результаты измерений, сохраненные в текстовых файлах, для стандартного образца СО-2 и для рельса обрабатываются в программной среде MathCAD. С помощью функции интерполяции частота дискретизации сигналов изменяется 204,8

МГц до 1024 МГц. С помощью взаимной корреляции вычисляется задержка Δt между временем распространения волны в рельсе и в СО-2. Случайная погрешность измерений не более 5 м/с. Используемый в работе способ определения скорости не позволяет найти абсолютное значение скорости в связи с определением скорости в эталонном образце (СО-2), что приводит к получению постоянной погрешности (± 59 м/с) [4].

Скорость головной волны, рассчитанная по измеренному времени на стометровом участке рельсовой плети с шагом в 1 м, изменяется от 5890 м/с до 5935 м/с, что может говорить о неоднородности одноосного напряженного состояния плети.

В зоне сварных соединений минимальная скорость наблюдается непосредственно в стыке свариваемых рельсов и составляет от 5870 м/с до 5890 м/с для разных стыков. При удалении от стыка на 70...90 мм скорость головной волны увеличивается на 50...70 м/с.

В области дефектов рельсов типа 41.2 «смятие и вертикальный износ» протяженностью 400 мм максимальная скорость головной волны наблюдается в центре дефекта, что примерно на 40 м/с выше средней скорости головной волны по длине рельса. При удалении от центра дефекта на 100 мм в скорость головной волны уменьшается на 80...100 м/с дефекта, а через 200 мм достигает средней скорости по длине рельса. Такое изменение скорости может говорить о неравномерности структурного состояния рельса по его высоте, связанного с технологией изготовления и накоплением повреждений.

ВЫВОДЫ

В зоне сварного соединения минимальная скорость наблюдается непосредственно в стыке свариваемых рельсов и составляет от 5870 м/с до 5890 м/с для разных стыков. При удалении от стыка на 70...90 мм скорость головной волны увеличивается на 50...70 м/с.

В области вертикального износа головки рельса максимальная скорость головной волны наблюдается в центре дефекта. При удалении от него на 100 мм скорость волны уменьшается на 80...100 м/с дефекта, а через 200 мм достигает средней по длине рельса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Суслов О.А., Новиков А.А., Карабутов А.А., Подымова Н.Б., Жаринов А.Н., Симонова В.А. Использование эффекта акустоупругости с применением лазерных источников и пьезоэлектрических приемников ультразвука для неразрушающего контроля напряженного состояния рельсовых плетей бесстыкового пути // Вестник транспорта Поволжья. 2015. № 1(49). С. 32—43.
2. Алешин Н.П. Современные информационные автоматизированные системы акустического контроля сварки // Автоматическая сварка. 2013. № 10—11(726). С. 67—71.
3. Муравьев В.В., Якимов А.В., Казанцев С.В. Распределение остаточных напряжений и скорости головной волны в рельсах // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2019. Т. 16. № 3. С. 70—76.
4. ГОСТ Р 55724-2013 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. – Введ. 2015-07-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 28 с.

© 2020 г. Земсков Тимур Иванович^{1*}, Г. В. Безрученков^{1**},
¹ – ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», 426069 г. Ижевск, ул. Студенческая, 7
Научный руководитель д.т.н., проф. В. В. Муравьев***
* - tim.zemskov@mail.ru; ** - 15bos@mail.ru; *** - e-mail***pmkk@istu.ru

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

Точное измерение скорости распространения ультразвуковых (УЗ) колебаний в твердых телах позволяет решать ряд технических и научных задач. Данный параметр позволяет оценивать свойства материала (например, его упругие модули), производить оценку химического состава, определять наличие внутренних напряжений (через значения акустоупругих коэффициентов) [1]. Кроме того, при известной скорости в материале, с помощью измерения времени пробега УЗ волны возможна прецизионная толщинометрия изделия.

Целью работы является разработка установки, позволяющей точное определение скорости ультразвука через измерение времени пробега импульсов акустических волн в твердых материалах.

Основными преимуществами установки являются наличие системы автоматической регулировки усиления, что позволяет производить регулировку уровня входного сигнала в автоматическом режиме (Рисунок 1). Кроме того, есть возможность программной обработки измеряемых величин, гибкая настройка на частотные параметры преобразователя и условия проведения измерений.

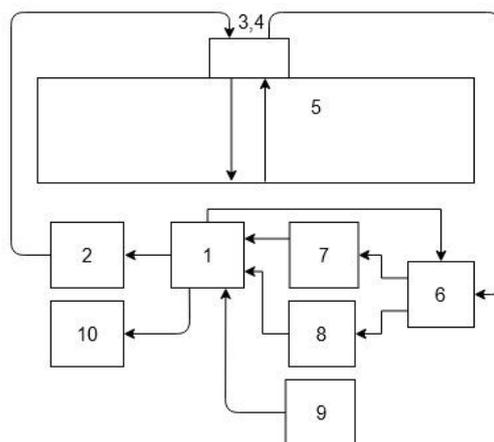


Рисунок 1 Блок-схема установки ИСАВ 1 – микроконтроллер; 2 – повышающий преобразователь; 3,4 – пьезопреобразователь; 5 – объект контроля; 6 – приемный усилитель; 7 – одновибратор; 8 – пиковый детектор; 9 – элементы управления; 10 – индикатор

Достоверность точности измерений была подтверждена также на ступенчатом образце из стали (Таблица 1). Результаты сравнимы с точностью измерений структуроскопа электромагнитно-акустического СЭМА (госреестр Госстандарта № 61957-

15), разработанного в Ижевском государственном техническом университете имени М.Т. Калашникова [2]. В основе метода лежит эффект акустоупругости, описываемый зависимостью скорости распространения ультразвуковых волн от механических напряжений, связанных через акустоупругие коэффициенты. Ввод и прием сдвиговых волн осуществляется бесконтактным ЭМА преобразователем.

Таблица 1

Результаты измерений скорости сдвиговых волн

Толщина, мм	Скорость сдвиговых волн ИСАВ, м/с	Скорость сдвиговых волн СЭМА, м/с
59,00	3240	3240
39,30	3240	3240
24,60	3239	3240
14,84	3240	3240

Таким образом, разработанная установка действительно обеспечивает решение поставленных задач по измерению времени пробега УЗ импульса, также есть возможность измерять скорость распространения как продольных, так и поперечных волн одновременно с достаточной точностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Разрушение и диагностика металлов. Смирнов А.Н., Муравьев В.В., Абабков Н.В. Москва-Кемерово, 2016. Сер. Техническое диагностирование. 479 с.
2. Оценка остаточных напряжений в рельсах с использованием электромагнитно-акустического способа ввода-приема волн. Муравьев В.В., Волкова Л.В., Громов В.Е., Глезер А.М. Деформация и разрушение материалов. 2015. № 12. С. 34-37.

Исследование скорости распространения tH-волн в алюминиевом ленере

© 2020 г. Ю.В. Мышкин^{1*}, Юлия Олеговна Санникова^{1**}
научный руководитель – О.В. Муравьева^{1,2}

¹ – ФГБОУ ВО Ижевский государственный технический университет имени
М.Т. Калашникова, 426069 Ижевск, Студенческая, № 7

² – ФГБУН УдмФИЦ УрО РАН, 426067 Ижевск, им. Татьяны Барамзиной, 34
* - mubm@yandex.ru; ** - kosheevasan@gmail.com

В твердых телах могут существовать все типы волн: объемные (продольные и поперечные), поверхностные и приповерхностные (рэлеевские и головные), направленные (волны Лэмба, Похгаммера, tH-). Использование направленных волн в современном волноводном акустическом методе контроля позволяет повысить производительность контроля за счет отсутствия сканирования и проводить экспресс-диагностику протяженных объектов. Чаще всего в современном волноводном контроле применяют tH-волны – волны, направление колебаний в которых параллельно ограничивающей поверхности (рис.1). Целью данной работы является проведение исследования скорости распространения tH-волн в объекте контроля.

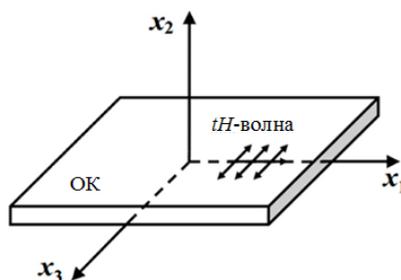


Рисунок 1 Распространение tH-волны в объекте контроля

Исследования скорости распространения tH-волн проведено в два этапа: 1) построение 3D-модели исследуемого объекта контроля и эмуляция распространения в нем tH-волн; 2) экспериментальное исследование в алюминиевом ленере с целью подтверждения результатов моделирования.

Построение 3D-модели алюминиевой трубы и моделирование распространения в ней tH-волн выполнено в программной среде COMSOL Multiphysics с использованием метода конечных элементов. Входные параметры для построения модели и эмуляции распространения tH-волн приведены в табл. 1.

Таблица 1

Входные параметры

Параметр	Численное значение	Единица измерения
Коэффициент Юнга, E	$70 \cdot 10^9$	Па
Коэффициент Пуассона, η	0,33	-
Скорость распространения, C	3050	м/с
Плотность материала, ρ	2700	кг/м ³

Внешний радиус трубы, $R1$	0,15	м
Внутренний радиус трубы, $R2$	0,14433	м
Длина трубы, L	0,12	м
Частота, $f0$	105	кГц
Период, $T0$	$9,524 \cdot 10^{-6}$	с

Экспериментальная установка представлена на рис. 2.



Рисунок 2 Экспериментальная установка

На основании проведенных исследований сделаны следующие выводы (рис.3): скорость распространения тН-волн неоднородна и достигает своего максимального значения (3106 м/с) в горизонтальном направлении распространения; присутствует асимметрия зависимости скорости, обусловленная неоднородностью толщины стенки исследуемого объекта контроля.

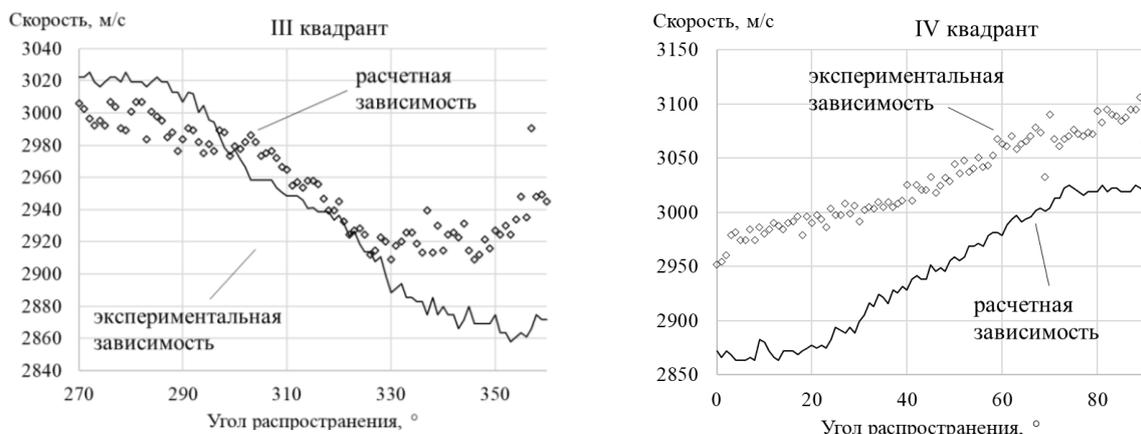


Рисунок 3 Расчетная и экспериментальная зависимость скорости тН-волны от угла распространения α для III и IV квадрантов

ЛИТЕРАТУРА

1. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Стрижак В.А., Мурашов С.А. Акустический волноводный контроль линейно – протяженных объектов. // М –во обр. и науки РФ, ФГБОУ ВО «ИжГТУ им. М.Т. Калашникова». - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017.– Ижевск, 2017 – С. 17-22.
2. Muraveva, O. V., Myshkin Yu.V., Sannikova Yu.O., Chukhlanceva T.S. The propagation of horizontally polarized shear wave in the hollow cylinder. Department of Measurement Control Diagnostic Instruments and Techniques, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation.

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОРРОЗИОННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ
ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ НА СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ЛЭМБА**
аспирант Захарова Дарья Дмитриевна^{1*}; научный руководитель, профессор, доктор
технических наук А. И. Потапов^{1,2**}

¹ – Санкт-Петербургский Горный университет, 199106 Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2

² – Санкт-Петербургский Горный университет, 199106 Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2

* - dasha-sevsk@yandex.ru; ** - apot@mail.ru

В процессе эксплуатации трубопроводов тепловых сетей происходит изменение толщины стенок труб в результате коррозии. В течение 10-12 лет стальные трубопроводы под воздействием коррозии могут утоняться до 1,5-2 раза от значения начальной толщины. Например, толщина стенок труб 12 мм после 10 лет эксплуатации местами может достигать 6 мм. Из-за неравномерного изменения толщины стенок трубы, вызванного коррозионным состоянием, целесообразно определение толщины не точечно, а усредненное значение толщины по длине трубопровода. Так как на сегодняшний день состояние трубопроводов тепловых сетей определяется путем проведения гидравлических испытаний, актуальной является задача диагностирования трубопроводов без разрушительных последствий.

В докладе рассмотрено поведение распространение волн Лэмба. Изменение толщины стенки трубы влияет на скорость распространение в ней волн Лэмба. На рис.1 представлена зависимость фазовой скорости от произведения толщины слоя на частоту ультразвукового сигнала в твердом теле.

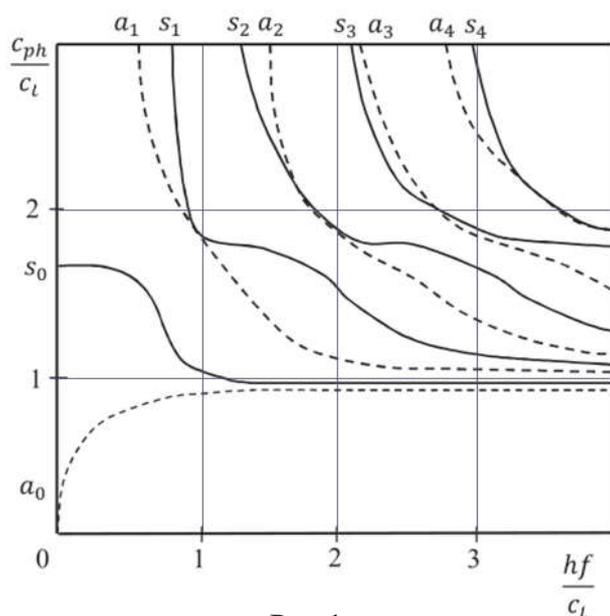


Рис.1

Для возбуждения волны Лэмба в трубопроводе необходимо добиться определенного соотношения длины волны с толщиной стенки трубы. Как правило, длина волны ультразвукового сигнала должна превышать толщину стенки трубопровода примерно в 5 раз. В докладе приведен пример расчета фазовой и групповой скоростей при частоте ультразвукового сигнала 100 кГц для трубы с толщиной стенки 12 мм, 9 мм и 6 мм. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

В таблице 2 приведены значения фазовых и групповых скоростей ультразвукового сигнала для моды a_0 , при $h = 12$ мм, 9 мм, 6 мм

h , мм	C_{ph} , м/с	C_g , м/с
12	5400	6000
9	4500	4900
6	3000	3500

Полученные теоретические результаты говорят о том, что изменение толщины материала, вызванное коррозией, оказывает влияние на изменение скорости прохождения волн Лэмба. Таким образом, предполагается, что, измеряя скорость прохождения волн Лэмба сквозь участок трубопровода можно судить о значении средней толщины стенки данного участка.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Петров Ю.В., Гуревич С.Ю.* Метод локального измерения скорости волн Лэмба, возбуждаемых лазерными наноимпульсами. СВАРКА И ДИАГНОСТИКА. Сборник докладов международного форума Екадеринбург. Изд-во: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. 2014. С. 296 – 301.
2. *Петров Ю.В., Гуревич С.Ю., Голубев Е.В.* Измерение скорости волн Лэмба, возбуждаемых лазерными наноимпульсами // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2014. Серия: Математика. Механика. Физика. С. 48 – 51.
3. *Баянов Е.В., Гулидов А.И.* Распространение упругих волн в трубе // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2012. №1 (25). часть 1. С. 100 – 103.
4. *Викторов И.А.* Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. Москва, Академия наук СССР Акустический институт: Изд-во Наука, 1966. 169 с.
5. *Пакушев И.С.* Лабораторная установка для исследования распространения ультразвуковых волн // Электронное научное издание «Ученые заметки ТОГУ», 2013. Том 4, № 4. С. 1052 – 1060.

Автоматизированный ультразвуковой контроль качества паяных соединений камер жидкостных ракетных двигателей

Никита Дмитриевич Сысунов *Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург,
Кронверкский пр. 49*

email: sysunov.n.d@gmail.com Телефон: +7-921-326-53-80

И.Ю. Кинжагулов *Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр. 49*

email: kinzhiki@mail.ru

Д.С. Сергеев *ООО «НТЦ «Эталон», г. Санкт-Петербург, ул. Матроса Железняка 57А*

email: dmt.sergeev.job@gmail.com

Цель работы

Повышение достоверности результатов контроля паяных соединений камер сгорания жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) на основе автоматизации ультразвукового контроля.

Суть обсуждаемой проблемы

Одним из наиболее ответственных элементов жидкостного ракетного двигателя является камера сгорания: температура внутри камеры достигает более 3000 К, а давление до 25 МПа. Следствием решения задачи эксплуатации при таких режимах стала разработка специальных охлаждающих трактов, благодаря которым становится возможным достижение требуемых характеристик ЖРД. В тоже время, в следствие высокой сложности изготовления таких камер, паяные соединения охлаждающих трактов подвержены формированию дефектов. Самым рациональным решением данной проблемы является применение современных методов неразрушающего контроля (МНК) для повышения качества камер сгорания ЖРД.

Применение различных МНК является обязательной составляющей жизненного цикла ЖРД. Исходя из характеристик данных методов, ультразвуковой метод оказался наиболее применимым для контроля качества паяных соединений. Однако в процессе контроля в ручном режиме большое негативное влияние на результаты оказывают ошибки, вносимые оператором оборудования неразрушающего контроля. Решением данной проблемы является разработка автоматизированной установки ультразвукового контроля качества паяных соединений камер сгорания ЖРД, которая позволит не только исключить влияние человеческого фактора, но и уменьшить время контроля.

Результаты

Разработана схема автоматизированного ультразвукового контроля качества паяных соединений с учётом особенностей конструкции, формы и размеров объекта контроля (ОК): ультразвуковой контроль осуществляется в теновом режиме в иммерсионной ванне. Генерация и прием сигнала осуществляется с использованием 4-х пар преобразователей частотой 5 МГц. Разработан алгоритм работы автоматизированного ультразвукового комплекса, основными элементами которого является вращение ОК вокруг своей оси и линейное перемещение датчиков вдоль оси вращения ОК. Сформулированы требования по точности позиционирования датчиков: предельно допустимая погрешность линейного перемещения на максимальное расстояние составляет 0,5 мм, углового перемещения на полный оборот – 0,7°.

С учетом разработанного алгоритма, была разработана и изготовлена автоматизированная установка ультразвукового контроля со следующими характеристиками позиционирования, подтвержденными экспериментально:

- Среднеквадратическое отклонение линейного перемещения на максимальное расстояние составило 0,071 мм;

- Среднеквадратическое отклонение углового перемещения на один полный оборот составило 0,043°.

Полученные характеристики полностью соответствуют сформулированным требованиям по точности позиционирования датчиков.

Была проведена экспериментальная апробация, по результатам которой были получены В-сканы бездефектных сечений ОК, а также сечений с моделированными дефектами (диаметрами 10 мм, 5 мм, 3 мм). На полученных сканах наблюдается четко различимая периодическая структура, характеризующая конструкцию охлаждающих трактов ОК; в местах, где были заложены имитаторы дефектов, наблюдаются четко-различимые прерывания периодической структуры.

Вывод

Была разработана и изготовлена опытный образец автоматизированной установки, получены результаты экспериментальной апробации, подтверждающие, что разработанная автоматизированная установка позволяет проводить контроль качества паяных соединений камер сгорания ЖРД с высокой степенью достоверности.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАТЫ СБОРА ДАННЫХ ДЛЯ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДЕФЕКТОСКОПА

© 2020 г. **Евгений Иннокентьевич Дьячковский**^{1*}, **Игорь Юрьевич Кинжагулов**^{2**}

1 - Университет ИТМО, 197101 Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, № 49

2 - к. т. н., Старший преподаватель университета ИТМО

* - oberprocuror1996@gmail.com

** - kinzhiki@mail.ru

Суть обсуждаемой проблемы.

Лазерно-ультразвуковой метод - направление оптико-акустического метода, предполагающего генерацию ультразвука лазерным импульсом за счет оптоакустического эффекта. Для генерации лазерного ультразвука используются импульсные лазеры с длительностью импульса от десятков наносекунд до фемтосекунд и с высокой пиковой мощностью. Лазерное излучение преобразуется в тепло в поверхностном слое специальной среды, называемой оптико-акустическим генератором, или материала исследуемой среды. За счет поглощения электромагнитной энергии локальное вещество быстро нагревается локально, происходит его последующее расширение и релаксация при таком возбуждении, что приводит к генерации ультразвуковых волн, так называемому оптико-акустическому эффекту. Если определенный порог мощности лазерного импульса превышен, материал генерирующей среды удаляется. Спектральный состав лазерного ультразвукового импульса определяется длительностью лазерного импульса, размером и формой пятна фокусировки лазерного излучения, а также свойствами генерирующей среды.

Существующие средства лазерно-ультразвукового контроля обладают рядом недостатков, к ним относятся:

- большие габариты генерирующего и принимающего блока, что существенно ограничивает мобильность средств неразрушающего контроля;
- отсутствие встроенной системы визуализации полученных данных, как следствие необходимость использование дополнительного персонального компьютера;
- отсутствие встроенного аккумулятора, что обуславливает необходимость постоянного питания от сети.

Целью работы является усовершенствование конструкции лазерно-ультразвукового дефектоскопа за счет разработки и интеграции современной платы сбора данных. Данная задача была решена в рамках проектирования и разработки лазерно-ультразвукового дефектоскопа.

Полученные результаты и выводы.

Анализ лазерно-ультразвукового метода показал то, что необходима достаточно большая частота регистрации данных для того, чтобы отследить сверхкороткий акустический импульс. Для этого были рассмотрены методы оцифровки сигналов. Также были рассмотрены существующие на рынке импульсные лазеры с диодной накачкой. Основным критерием выбора были малые массогабаритные характеристики, чем у существующего аналога лазерно-ультразвукового дефектоскопа УДЛ-2М. Также учитывались его основные характеристики, такие как: энергия в импульсе, частота генерации импульса, апертура пучка, частотный диапазон лазерного импульса.

Для будущего устройства, с помощью пакета программ для проектирования печатных плат Altium Designer 20, разработана плата сбора данных для регистрации и передачи данных в ПК. На данном этапе были спроектированы принципиальные схемы цепи питания, аналоговой части, ответственной за прохождение сигнала без потерь информации, цифровой части, ответственной за общение АЦП и ПЛИС.

Разработан алгоритм регистрации и передачи данных с платы сбора данных с учетом всех функциональных в ней узлов и блок регистрации данных с АЦП с учетом его особенностей. Подтверждена работоспособность платы сбора данных. В ходе проверки были выявлены всплески шумов, связанные с импульсным регулятором напряжения в цепи питания датчика. Также был получен сигнал с датчика.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Быченко В.А., Кинжагулов И.Ю., Никитина М.С.* Исследование метода лазерно-ультразвуковой диагностики остаточных напряжений в специальных материалах изделий ракетно-космической техники// Сб. матер. I Междунар. науч.-практ. конф. "Технические науки: современные проблемы и перспективы развития". 2013. С. 61-63..
2. *Карабутов А.А., Жаринов А.Н., Ивочкин А.Ю., Капильный А.Г.* Лазерно-ультразвуковой метод выявления продольных напряжений рельсовых плетей // Мир измерений. 2012. №9.С. 10-17.
3. *Муха, Ю.П., Королева И.Ю.* Информационно-измерительные системы: учеб. пособие //ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – 108 с.
4. *Балдин М.В., Воронков Д.И., Руткевич А.В., Сенченко М.Н., Стешенко В.Б., Шишкин Г.В.* Эволюция применения ПЛИС в системах ЦОС: от специализированного сопроцессора к аппаратной платформе// Цифровая обработка сигналов. 2008. № 2.С. 58-64.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

© 2020 г. Ковалевич Анастасия Сергеевна, И.Ю. Кинжагулов,

К.А. Степанова

Университет ИТМО, 197101, г. Санкт-Петербург,

Кронверкский проспект, д.49, литер А

kovalevi4.a.s@gmail.com¹; kinzhiki@mail.ru²; ledy.xs93@yandex.ru³

На сегодняшний день во всем мире активно развивается рынок аддитивного производства. Под аддитивными технологиями принято понимать изготовление изделий путем послойного добавления материала, что является существенной отличительной особенностью от традиционной механообработки, заключающейся в удалении материала [1-2]. Вследствие этого открывается возможность в изготовлении изделий сложных форм, в том числе сложнопрофильных деталей. Наряду с этим к преимуществам данного способа получения изделий можно отнести высокую материалоеффективность, автоматизированный процесс производства, широкий выбор металлических порошков, высокое качество изделий. Перечисленные параметры позволяют использовать полученные детали в различных отраслях промышленности: авиа-, ракето-, судо- и машиностроении.

Однако, существует и ряд недостатков, характерных для изделий, изготовленных аддитивными технологиями, таких, как: наличие дефектов на макроуровне (поры, раковины, трещины, включения). Наличие структурных неоднородностей в свою очередь оказывает существенное влияние на механические свойства реальных изделий: например, пористость способствует снижению усталостных характеристик и зачастую является причиной возникновения усталостных трещин. Вследствие этого на сегодняшний день возрастает необходимость неразрушающего контроля качества изделий, в частности, при исследовании прочностных характеристик [3-4].

В качестве метода анализа процессов разрушения деталей, изготовленных по аддитивной технологии SLM (селективного лазерного сплавления), была выбрана акустическая эмиссия. Данный метод основан на анализе параметров акустических (упругих) волн, возникающих в материале детали при перестройке внутренней структуры [5, 6]. Анализ таких параметров на различных стадиях развития дефектов позволит сформировать картину кинетики разрушения и разработать методики прогнозирования характеристик деталей и изделий в процессе эксплуатации.

Объектом исследования процесса развития дефектов выбраны металлические изделия стандартизированной формы, изготовленные по аддитивной технологии SLM с использованием жаропрочного сплава Inconel

718. В работе рассматриваются четыре типа образцов: бездефектные, с поверхностным дефектом и с внутренними дефектами.

В рамках поставленной задачи были проведены циклические испытания объектов контроля, в ходе которых был определен предел прочности. Также были выявлены информативные параметры акустической эмиссии (АЭ), чувствительные к развитию полей концентрации напряжений.

Для нагружения объектов исследования использовалась испытательная машина LFM 150 кН. Регистрация сигналов акустической эмиссии при проведении циклических испытаний осуществлялась системой цифровой акустико-эмиссионной диагностической СЦАД 16.10.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зленко М.А.* Аддитивные технологии в машиностроении / М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // пособие для инженеров. – М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. 220 с.

2. *Антонова В.С., Осовская И.И.* Аддитивные технологии: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2017.-30 с.

3. *Алёшин Н.П., Мурашов В.В., Евгенов А.Г., Григорьев М.В., Щипаков Н.А., Василенко С.А., Краснов И.С.* Классификация дефектов металлических материалов, синтезированных методом селективного лазерного сплавления, и возможности методов неразрушающего контроля для их обнаружения // Дефектоскопия. 2016. № 1/ С. 48–55.

4. *Tapia G., Elwany A.* A review on process monitoring and control in metal-based additive manufacturing // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 136(6). 2014. Oct, P. 060801–060801.

5. *Wu H.; Yu Z.; Wang Y.* A New Approach for Online Monitoring of Additive Manufacturing Based on Acoustic Emission // In Proceedings of the ASME 2016 11th International Manufacturing Science and Engineering Conference. 2016. P.V003T08A013. MSEC2016-8551.

6. *Strantzla M., Van Hemelrijck D., Guillaume P., Aggelis D.G.* Acoustic emission monitoring of crack propagation in additively manufactured and conventional titanium components // Mech. Res. Commun. 2017, 84, P. 8 – 13.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Автор: Артём Павлович Артющенко^{1,2*}

Научный руководитель: д.т.н. Носов Виктор Владимирович^{1,2**}

¹ – Санкт-Петербургский горный университет, 199106 Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия дом 2

² – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251 Санкт-Петербург, Политехническая улица, дом 29

* - artemartyuschenko@gmail.com; ** - nosovvv@list.ru

* - 8-921-772-63-81.com; ** - 8-904-617-94-38

Аннотация. Разрабатываемое программное обеспечение (ПО) базируется на подходе, основанном на многоуровневой модели временной зависимости параметров АЭ, оценке параметров интенсивности упругого однородного разрушения представительных структурных элементов изделия и универсальных прочностных наноконстант. Процесс разработки характеризуется сложностью программной реализации автоматизации алгоритма поиска линейного участка зависимости логарифма числа импульсов от времени (этап однородного разрушения) и алгоритма расчёта значений параметров функции распределения с целью совпадения теоретической и экспериментальной кривых зависимости числа импульсов акустической эмиссии от времени.

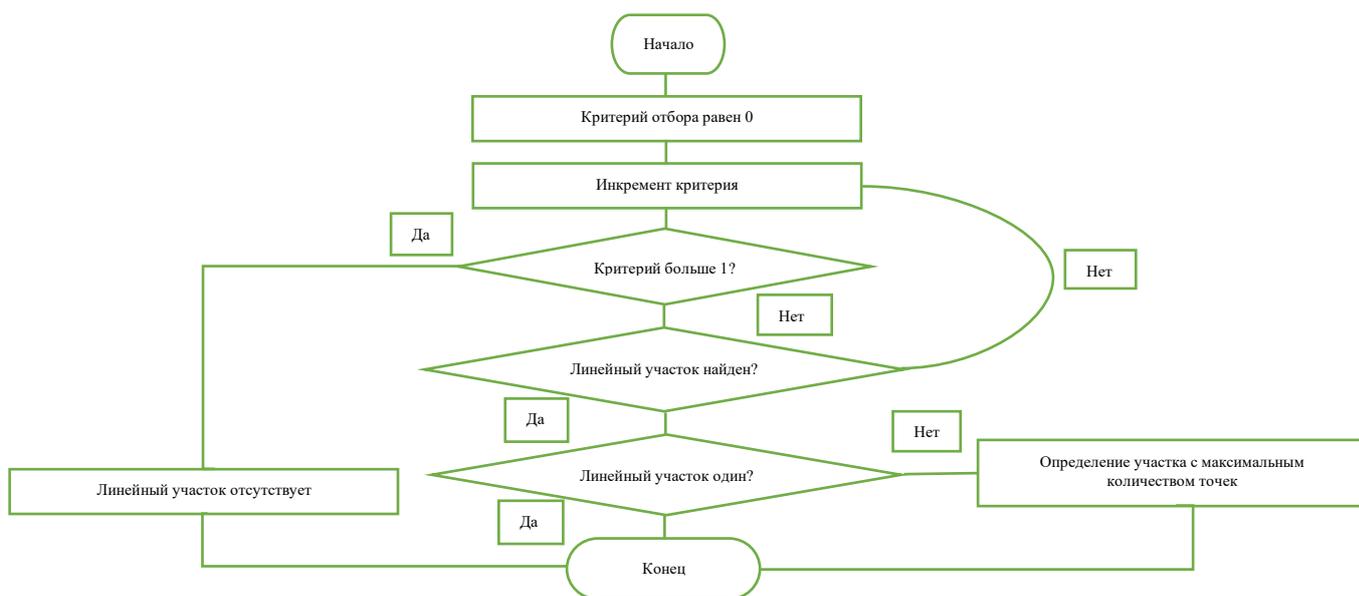
Технология разработки программного обеспечения. К программному обеспечению предъявляются следующие требования: мобильность, надежность, эффективность, учет человеческого фактора, модифицируемость. С целью обеспечения надежности и модифицируемости ПО было принято решение о максимально возможном логически обоснованном разделении функций ПО по функциональным модулям. Данное решение предоставляет возможность оснащения каждого функционального модуля обработчиком внештатных событий, а также может обеспечить удобство и другие возможности при необходимости модификации программного кода.

Импортируемый в программу файл данных содержит 10 столбцов данных, в которые входят следующие характеристики акустико-эмиссионного испытания: время (с); номер сигнала (ед.); номер канала (ед.); амплитуда сигнала (дБ); энергия сигнала ($\text{мВ}^2 \cdot \text{мс}$); разница времени прихода сигналов (мкс); длительность сигнала (мкс); число выбросов (ед.); время нагружения (с); нагрузка (Н).

Реализация. Алгоритм автоматизации поиска линейного участка кривой. Для создания ПО был выбран язык объектно-ориентированного программирования C++. Данный язык программирования обладает рядом важных преимуществ для реализации данного проекта, таких как: высокая производительность, кроссплатформенность, многопоточность, универсальность. Процесс разработки ПО базируется на основных принципах объектно-

ориентированного программирования: абстракция, полиморфизм, наследование, инкапсуляция [1, 2]. Применяется опыт предшествующих разработок, созданных ранее кафедрой приборостроения электромеханического факультета Горного университета, но не включающих в себя решение задачи автоматизации процессов [3]. Также используется опыт зарубежных коллег в развитии прикладного ПО систем АЭ диагностики [4].

Алгоритм автоматизации поиска линейного участка кривой зависимости логарифма числа импульсов от времени (определение этапа однородного разрушения) реализуется на основе вычисления углов наклона участков кривой через тангенсы углов. Критерием отбора точек линейного участка является разность углов соседних участков кривой, значение которой не должно быть больше начального значения равного 0.1° . Значение критерия может увеличиваться вплоть до достижения значения равного 1° , если ни один линейный участок не обнаружен. При условии нахождения нескольких линейных участков определяется участок кривой, который содержит в себе большее количество точек. На основе данного алгоритма была составлена блок-схема модуля автоматизированного определения линейного участка кривой зависимости логарифма числа импульсов от времени.



ЛИТЕРАТУРА

1. *Stroustrup B.* Programming Principles and Practice Using C++ // Addison-Wesley. May 2014. 1312 pages.
2. *Eckel B.* Thinking in C++ // New Jersey: Prentice Hall. 1995. 857 pages.
3. *Носов В.В.* Автоматизированная оценка ресурса образцов конструкционных материалов на основе микромеханической модели временных зависимостей параметров акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2014. № 12. с. 24-35.
4. *Skalskii V.R., Stankevich O.M., Klim B.P., Pochapskii E.P.* Features of software for acoustic-emission diagnostic means // Quarterly Scientific-Technical and Production Journal Technical Diagnostics And Non-Destructive Testing № 4. 2010. p. 16.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ БЛОКОВ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН

© 2020 г. Евгений Александрович Павлухин^{1*}, В. В. Малый^{1**}, А. С. Костюхин^{1***}

¹ – Университет ИТМО, 197101 Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

* - zhekakbr@gmail.com; ** - banqvalera@mail.ru; *** - nox9999@yandex.ru

Цель работы. Создание автоматизированного комплекса ультразвукового контроля и разработка методики контроля качества блоков гидроакустических антенн, обеспечивающей обнаружение дефектов.

Суть обсуждаемой проблемы. Для решения задач по измерению глубин и обследованию рельефа дна, обнаружению и распознаванию морских объектов современные корабли оснащаются гидроакустической аппаратурой, в состав которой входят гидроакустические антенны, предназначенные для преобразования электрических колебаний, создаваемых генератором, в акустические колебания водной среды (режим излучения) и для преобразования отраженных акустических колебаний в электрические сигналы (режим приема). Антенна состоит из набора приемных и излучающих блоков, гидроакустических экранов и кабелей, помещенных в резиновую оболочку, армированную железной сеткой, и заполненную полиуретановым наполнителем[1].

На этапе изготовления блоков гидроакустической антенны возможно образование дефектов типа «пора в наполнителе» и «расслоение между оболочкой и наполнителем», которые существенным образом влияют на качество апертуры направленности антенны. Следует отметить, что современная устоявшаяся технология контроля качества антенн предусматривает проведение их испытаний в гидробассейне, что не позволяет еще на этапе изготовления блоков произвести их отбраковку, а при необходимости и ремонт до окончательной сборки антенны.

Учитывая особенности конструкции блока, для поиска дефектов предложено использовать ультразвуковой эхо-метод, который основан на регистрации сигналов ультразвуковых волн, отраженных от дефекта или поверхности раздела двух сред. Для обеспечения стабильности акустического контакта было предложено использовать иммерсионный способ ввода ультразвука, при котором блок антенны погружен в жидкость (в воду), которая используется как контактная среда между блоком и ультразвуковым пьезопреобразователем (ПЭП).

Результаты. Для реализации автоматизированного ультразвукового контроля блоков гидроакустических антенн (БГА) используется комплекс, в состав которой входит:

автоматизированный комплект перемещения и позиционирования(КПП) ПЭП; Электронный блок управления (ЭБУ); многоканальный ультразвуковой дефектоскоп УМД-8; система обработки результатов контроля(СОРК) на базе ПК. Перемещение и позиционирование ПЭП реализовано на: 3 шаговых двигателях, 2 абсолютных энкодерах и 3 парах концевых выключателей.

Перемещение и позиционирование КПП выполняется ЭБУ, принимающим управляющие сигналы из СОРК. Перемещение должно происходить по трём осям: X, Y, Z.

ЭБУ обеспечивает питание двигателей в процессе работы, взаимодействие СОРК и КПП, отключение двигателей КПП в случае нажатия на кнопку аварийной остановки.

Для проведения ультразвукового контроля блока антенны была предложена двухэтапная схема посекторного построчного сканирования его поверхности с обратным ходом. При этом блок антенны условно разбивается на 32 сектора, что соответствует дискретному шагу поперечного сканирования в 8 мм и обеспечивает полное сканирование всей поверхности БГА.

Сущность двухэтапности заключается в том, что на первом этапе контроля осуществляется сканирование в секторах с 1 по 16, т.е. контроль одной стороны блока антенны, а на втором этапе осуществляется поворот блока относительно продольной оси на 180° и сканирование в секторах с 17 по 32. Поиск дефектов типа «расслоение между оболочкой и наполнителем» проводился в прямом направлении сканирования, а дефектов типа «пора в наполнителе» при обратном сканировании.

Необходимо отметить, что достоверность и оперативность результатов контроля во многом зависит от точности позиционирования преобразователя относительно объекта контроля, а также сведения к минимуму возможной ошибки дефектоскописта при расшифровке зарегистрированных эхо-сигналов. Данную проблему решает автоматизация процесса ультразвукового контроля, которая включала создание автоматизированного комплекса неразрушающего контроля и разработку специального программного обеспечения для обработки результатов измерений.

Вывод. В ходе отработки был проведен сравнительный анализ результатов ультразвукового контроля блока антенны с результатами ее испытаний в гидробассейне, который подтвердил работоспособность технологии контроля и комплекса в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров А.В. Ультразвуковой контроль качества гидроакустических антенн / А.В. Федоров, В.А. Быченко, М.Ф. Кормильцева, Д.С. Сергеев, Н.В. Ткачева, К.А. Батанов, А.В. Гаринков // Дефектоскопия. – 2019. – №2. – С. 36-42.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАСТРОЕК УЛЬТРАЗВУКОВОГО СКАНЕРА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2020 г. Анжелика Денисовна Широбокова^{1*}

Научный руководитель – О.П. Богдан¹

¹ – ИЖГТУ имени М. Т. Калашников, Ижевск

*- shirobokova_1996@bk.ru

Ультразвук (УЗ) относительно недавно появился в медицине, тем не менее, он активно развивается, и его используют практически во всех ее областях, а именно в диагностике и терапии [1]. Он позволяет быстро в режиме реального времени получить информацию о здоровье пациента. Согласно ГОСТ ИЕС 61157 – 2013 [2] при различных вариациях настроек датчика сканера и режимах его излучения допустимы максимально возможные уровни следующих величин: для $I_{ob} < 20$ мВт/см², для $p < 1$ МПа, для $I_{spta} < 100$ мВт/см² [2].

Цель данной работы заключается в исследовании влияния вариации настроек сканера на его выходную интенсивность излучения.

Сущность метода, заключается в измерении временных характеристик и амплитуды сигнала с поверхности УЗ датчика сканера EDAN U50 при помощи осциллографа с подключенным к нему приемником из пьезопленки PVDF LDT0-028K. Регистрируем сигнал с поверхности датчика сканера контактным способом, затем зная чувствительность приемника по уровню интенсивности S_I (1) и измеренное электрическое напряжение $U_{эл}$, высчитываем значение максимальной интенсивности импульса I_{SPTP} по формуле (2) [3, 4]:

$$S_I = \frac{Q^2 d_{33}^2 d_n^2 (2z_1 K^2)}{(\varepsilon^2 \varepsilon_0^2)}, \quad (1)$$

где $z = \rho c$ – акустическое сопротивление среды, $c = 1960$ м/с – скорость УЗ волны в пьезопленке из PVDF LDT0-028K, ρ – плотность пьезопленки; $d_n = 28$ мкм – толщина пьезоэлемента; $\varepsilon = 12$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; Q – добротность пьезоэлектрического приемника; K – коэффициент потерь на границах раздела сред; $d_{33} = 20 \cdot 10^{-12}$ Кл/м – пьезомодуль. Значения чувствительности приемника по уровню интенсивности получились следующими: для $f = 2,5$ МГц $62,5 \cdot 10^{-6}$ (Вт/м)², для $f = 3,5$ МГц $65,6 \cdot 10^{-6}$ (Вт/м)², для $f = 4,5$ МГц $65,7 \cdot 10^{-6}$ (Вт/м)².

$$I_{SPTP} = \frac{U_{эл}^2}{S_I} \quad (2)$$

Для расчета интенсивности в пространстве использовали выражение(3):

$$I_{SPPA} = 6I_{SPTP} \quad (3)$$

Для определения средней во времени интенсивности I_{SPTP} выполняем усреднение I_{SPTP} за время, равное периоду повторения импульсов T_n ($T_{1..4}$) по формуле (4):

$$I_{SPTA} = I_{SPPA} \frac{\tau_u}{T_n}, \quad (4)$$

где τ_i – длительность импульса, мкс.

Поскольку исследуемый УЗ сканер излучает УЗ волну пачками импульсов, то при расчётах необходимо делать усреднение, тогда формула (4) примет следующий вид [3, 4]:

Для количества фокусов 1 интенсивность излучения I_{SPTA} находим по формуле (5):

$$I_{SPTA} = I_{SPPA}(\tau/T_1)(\tau_p/T_{pps}). \quad (5)$$

Для количества фокусов 2 интенсивность излучения I_{SPTA} находим по формуле (6):

$$I_{SPTA} = I_{SPPA}(\tau/T_1)(\tau_p/T_{pps})(T_1/T_2). \quad (6)$$

Для количества фокусов 3 интенсивность излучения I_{SPTA} находим по формуле (7):

$$I_{SPTA} = I_{SPPA}(\tau/T_1)(\tau_p/T_{pps})((T_1 + T_2)/T_3). \quad (7)$$

Для количества фокусов 4 интенсивность излучения I_{SPTA} находим по формуле (8):

$$I_{SPTA} = I_{SPPA}(\tau/T_1)(\tau_p/T_{pps})((T_1 + T_2 + T_3)/T_4). \quad (8)$$

Измерения проводили для конвексного датчика сканера в В-режиме при варьировании следующих настроек: частоты УЗ излучения, количества фокусов, количества фокус позиций, установленной глубины обзора (RGD). Полученные результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерения интенсивности УЗ излучения I_{SPTA} с поверхности датчика УЗ сканера

Кол-во фокусов	RGD, мм									Количество фокус позиций								
	5			15			25			0			7			15		
	$f, \text{МГц}$									$f, \text{МГц}$								
	2,5	3,5	4,5	2,5	3,5	4,5	2,5	3,5	4,5	2,5	3,5	4,5	2,5	3,5	4,5	2,5	3,5	4,5
1	75	182	165	76	118	93	54	81	48	56	64	53	73	73	73	83	80	48
2	31	63	55	28	49	30	15	27	16	15	33	15	16	23	21	18	28	22
3	66	93	85	45	105	63	33	60	35	33	49	46	33	44	42	39	45	35
4	54	98	99	53	65	70	44	83	48	39	74	70	45	68	56	56	53	43

Из полученных результатов можно сделать вывод, что на интенсивность излучения влияют такие параметры как, частота излучения, количество фокусов, установленная глубина обзора и количество фокус позиций, их вариация может значительно изменить значения интенсивности УЗ излучения, а также привести к превышению ее предельно допустимого значения, согласно ГОСТ ИЕС 61157-2013 предельно допустимое значение интенсивности равно 100 мВт/см^2 .

ЛИТЕРАТУРА

1. Хилл. К. Ультразвук в медицине. Физические основы применения. Москва: Изд-во Физматлит, 2008. 544 с.
2. ГОСТ ИЕС 61157–2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Изделия медицинские электрические. Приборы ультразвуковые диагностические. Требования к представлению параметров акустического выхода в технической документации. Введ. 01.01.2016. Москва: Изд-во Стандартиформ, 2014. 32 с.
3. Богдан О.П., Широбокова А.Д., Гуляева А.С., Халтурина Т.А. Исследование влияния глубины обзора на уровень интенсивности ультразвукового излучения // Сборник материалов XV Всероссийской научно-технической конференции. 2019. С. 86 – 93.
4. Bogdan O.P., Muravieva O.B., Gulyaeva Y.S., Shirobokova A.D. Study of the effect of ultrasound scanner settings on the level of radiation intensity by the reciprocity method // Journal of physics: Conference series 2019.С. 12022.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АРМАТУРЫ НА СКОБЕ-НАКЛАДКЕ ЭХО-МЕТОДОМ

© 2020 г. **Владислав Сергеевич Николаев**^{1*}, **И. А. Останин**^{1**}, **С. В. Николаев**^{1***}
¹ – ФГБОУ ВО “Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I”, 190031 г. Санкт-Петербург, Московский пр-т., д. 9
* - nagato_ndt@mail.ru, 8 981 806 26 46; ** - ila-ost@yandex.ru, 8 911 996 77 54;
*** - nikol_ndt@mail.ru, 8 911 101 44 50

В настоящее время основным нормативно-техническим документом, который регламентирует проведение ультразвукового контроля (УЗК) арматурных соединений является ГОСТ 23858-2019. В данном нормативно-техническом документе установлены основные требования к ультразвуковому контролю зеркально-теневым методом (ЗТМ) для стыковых однорядных соединений стержней диаметром от 20 до 40 мм.

Для УЗК стыковых сварных соединений выбираются пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) с заданными параметрами (частота и угол призмы) в зависимости от диаметра арматуры базовым (установочным) расстоянием между ПЭП, которое зависит от диаметра стержня арматуры и типа сварного соединения.

Проведенные практические исследования 250 образцов стыковых сварных соединений на скобе-накладке показали, что протяженность скоб-накладок в среднем составляет 105 мм для Образца 1 (диаметр 28 мм) и 116 мм для Образца 2 (диаметр 32 мм).

В результате проведенных экспериментальных исследований УЗК сварных соединений арматуры на скобе-накладке (с реального объекта) показали, что ее длина больше или равна расстоянию между ПЭП, установленным ГОСТ 23858-2019, что обеспечивает установку преобразователей только в положении 2-2 и невозможность установки ПЭП в положении 1-1 и 3-3. Данное условие не позволяет полностью провести УЗК сварного шва арматуры. В связи с этим, возникает необходимость в применении дополнительных методов ультразвукового контроля.

Анализ существующих методов УЗК показал, что одним из распространенным и эффективным является эхо-метод.

Для осуществления УЗК эхо-методом были проведены расчеты минимальных углов ввода преобразователя для обеспечения полного прозвучивания сварного шва.

Проведенный анализ нормативно-технической документации (НТД) показал, что в настоящее время отсутствуют достоверные значения размеров дефектов, выявляемых при контроле ЗТМ в стыковых сварных соединениях на скобе-накладке.

Перед проведением расчетов чувствительности для эхо-метода, были определены площади минимальных дефектов, выявляемых при ЗТМ, в соответствии с формулой, полученной экспериментально - теоретическим путем профессором Н. П. Алешиным.

На основе полученных результатов была рассчитана чувствительность контроля эхо-методом. В качестве выявляемых дефектов взяты дисковые отражатели, размеры которых представлены в таблице для соответствующего диаметра арматуры. В качестве опорного сигнала было взято отверстие диаметром 6 мм на глубине 15 мм в мере СО-2.

Для проверки результатов расчета были выполнены образцы с искусственными отражателями. Испытательные образцы представляют собой стыковое сварное соединение на скобе-накладке арматурных стержней диаметром 32 мм, в которых были выполнены 4 сегментных отражателя, соответствующие. Два отражателя были выполнены в сварном соединении и соответствовали Баллу 1 (негодный) и Баллу 2 (ограниченно годные) типам дефектов.

В начале использовался преобразователь с углом ввода 70° . Контролировалось сварное соединение прямым лучом в нижней части скобы-накладки. В результате проведенных измерений был выявлен первый, второй и четвертый сегментные отражатели. Однако расчетная чувствительность не совпала с экспериментальной чувствительностью.

После этого проводились экспериментальные исследования по выявлению дефектов при контроле однократно отраженным лучом. Контроль осуществлялся с помощью ПЭП с углами вводов 50° , 65° , 70° . В ходе экспериментальных исследований был выявлен второй сегментный отражатель при контроле ПЭП однократно отраженным лучом с углами ввода 65° и 50° . Однако, при контроле однократно отраженным лучом с помощью ПЭП с углом ввода 70° не были выявлены дефекты типа сегментный отражатель.

В ходе проведения экспериментальных исследований было выявлено:

- возможность контроля стыковых сварных соединений на скобе-накладке УЗ эхо-методом;
- разница между расчетными значениями чувствительности и значениями, при которых были выявлены дефекты, составляет более 20 дБ;
- необходимость в дополнительных исследованиях по контролю стыковых сварных соединений арматур на скобе-накладке УЗ эхо-методом на образцах различного диаметра для определения коэффициента, который учитывал бы влияние слоя контактной смазки и арматурных ребер жесткости при расчете чувствительности контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Швидко Я.И. Железобетонные конструкции. Основные сведения о железобетоне. Москва: МИИТ, 2003. 57 с.
2. ГОСТ 23858-2019 Соединения сварные стыковые арматуры железобетонных конструкций. Ультразвуковые методы контроля качества. Правила приемки. Москва: Изд-во стандартов, 1979. 23 с.

3. ГОСТ 5781-82 Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия. Москва: Изд-во стандартов, 1983. 10 с.
4. ГОСТ Р 55724-2013 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. Москва: Изд-во Стандартиформ, 2014. 28 с
5. *Алешин Н.П.* Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений. Москва: Изд-во Машиностроение, 2013. 576 с.
6. *Кретов. Е. Ф.* Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении. Санкт-Петербург: Изд-во СВЕН, 2014. 312 с.
7. *Алешин. Н.П.* Методы акустического контроля металлов. Москва: Изд-во Машиностроение, 1989. 454 с.
8. *Алешин Н.П., Лупачев В.Г.* Ультразвуковая дефектоскопия. Справочное пособие Минск: Высшая школа, 1987. 271 с
9. *Кретов. Е. Ф.* Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении. Санкт-Петербург: Изд-во СВЕН, 2014. 312 с.
10. ГОСТ 14098-2014 Соединения сварные арматуры и закладных изделий железобетонных конструкций. Типы, конструкции и размеры. Москва: Изд-во Стандартиформ, 2015. 41 с.

ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ КАПИЛЛЯРНОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

© 2020 г. Илья Алексеевич Останин^{1*}, Г.Я. Дымкин¹, В.Н. Коншина¹,
Т.И. Захаренко²

¹ – ФГБОУ ВО «Петербургский университет путей сообщения Императора Александра I», 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

² – ОАО «Тверской вагоностроительный завод», 170003, Тверь, Петербургское шоссе, 45-б

* - ila-ost@yandex.ru, +7(911) 996-77-54

В докладе приводятся основные результаты верификации методики капиллярного контроля (далее КК) сварных соединений, деталей и узлов (из поковок, проката и литья) подвижного состава, изготавливаемых на ОАО «Тверской вагоностроительный завод».

ГОСТ 34513 [1] (п.4.8) устанавливает, что подтверждение соответствия методики НК продукции заявленным показателям назначения и пригодности методики НК по ГОСТ ИСО/МЭК 17025 [2] выполняются посредством представления объективных свидетельств при верификации методики НК по ГОСТ 33514 [3].

Для проведения верификации в соответствии с требованиями [3] была разработана программа, которая включала в себя следующие этапы:

- документарная экспертиза;
- экспериментальные исследования методики КК с использованием тест-образцов;
- анализ результатов экспериментальных исследований методики КК, определение показателей назначения, подготовку заключения.

На этапе документарной экспертизы выполнялся сравнительный анализ показателей назначения и значений параметров контроля, указанных в методике КК, и требований действующих технических условий и нормативных документов.

Этап экспериментальных исследований включал:

- определение соответствия реализованных параметров контроля значениям, указанным в методике КК;
- проведение КК тест-образцов в соответствии с методикой.

На этапе подготовки к верификации для проведения КК было отобрано 2 группы тест-образцов. Группа 1: 20 тест-образцов, не содержащих дефектов. Группа 2: 18 тест-образцов (сварные соединения (сталь 09Г2С) с длиной контролируемого сварного шва 120 мм и 160 мм), детали пуансон (сталь 40Х) диаметром 50 мм, высотой 30 мм, в которых по результатам предварительных исследований были обнаружены признаки дефектов.

В качестве арбитражного метода для образцов группы 1 применялся магнитопорошковый контроль, для образцов группы 2 – макроисследование по размеченным участкам или магнитопорошковый контроль.

Для проведения экспериментальных исследований применялся комплект дефектоскопических материалов для цветного метода КК в аэрозольной упаковке, включающего пенетрант NORD-TEST Kontrastrod U 88, очиститель NORD-TEST U 87 и проявитель NORD-TEST U 89. Экспериментальные исследования выполнялись в виде скрытого теста. Контроль выполнял специалист II уровня квалификации по КК, экспертный магнитопорошковый контроль – специалист II уровня квалификации по магнитному контролю [4].

По результатам экспериментальных исследований была выполнена процедура паспортизации тест-образцов.

Несмотря на отсутствие в методике требований достоверности, были определены показатели достоверности по ГОСТ 33514 [3]. В связи с тем, что в процессе экспериментальных исследований все дефекты в тест-образцах были выявлены и отсутствовали случаи ложного обнаружения дефектов расчет показателей достоверности производился в соответствии с ГОСТ Р ИСО 3534 – 1 [5]. При доверительной вероятности 0,95 значение вероятности выявления составило 0,83, значение вероятности перебраковки - 0,05.

На основании полученных результатов верификации методика была признана соответствующей ее назначению, т.к. показатели назначения соответствовали показателям, указанным в методике, все дефекты в тест-образцах были выявлены и отсутствовали случаи ложного обнаружения дефектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 34513-2018 Система неразрушающего контроля продукции железнодорожного назначения. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2019. – 11 с.
2. ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. – М.: Стандартинформ, 2019. – 25 с.
3. ГОСТ 33514-2015 Продукция железнодорожного назначения. Порядок верификации методик неразрушающего контроля. – М.: Стандартинформ, 2016. – 11 с.
4. *Муравьев В.В., Волкова Л.В., Платунов А.В., Булатова Е.Г., Байкалова Т.Н.* Анализ результатов тестирования специалистов по магнитному виду неразрушающего контроля при сертификации // Контроль. Диагностика. 2015. №10. С. 36 – 42.
5. ГОСТ Р ИСО 3534-1-2019 Статистические методы. Словарь и условные обозначения. Часть 1. Общие статистические термины и термины, используемые в теории вероятностей. – М.: Стандартинформ, 2020. – 65 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

© 2020 г. Артемьев Руслан Евгеньевич^{1*}, Ситдикова^{1**}

А.Ф., Атрощенко В.В.^{1***}, Савичев М.П.^{1****}

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет»

aruslan98@mail.ru*; nastya-sitdikova@yandex.ru**, 91250@mail.ru***,

savichevmax@mail.ru****

Ключевые слова: методы неразрушающего контроля, сварка трением с перемешиванием, алюминиевый сплав.

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема сварки алюминиевых сплавов традиционным способом заключается в склонности металла шва с высокой теплопроводностью, коэффициентом теплового расширения в сравнительно широком диапазоне температуры застывания и растворимостью водорода в алюминии в расплавленном состоянии к усадке в два раза большей при затвердевании, разрушению в зонах теплового воздействия по стыкам деталей и образованию дефектов: несплошностей, цепочек пор в шве и у зоны сплавления, трещин в высокотемпературной зоне термического влияния, включений прочной оксидной пленки и ферросплавов в шве. Одним из вариантов решения указанной проблемы является использование сравнительно нового сварочного процесса - сварки трением с перемешиванием (СТП). Однако данному способу сварки присущи специфические дефекты, например, “заглаженный непровар” в виде стыковой линии неправильной формы толщиной в доли микрона. Разработка технологий НК становится первоочередной задачей, в том числе для оборонно-промышленного комплекса и Роскосмоса.

В настоящее время на кафедре современных методов сварки и неразрушающего контроля конструкций (СМСиКК) ФГБОУ ВО УГАТУ проводятся НИР по разработке технологии СТП алюминиевых сплавов с использованием переоборудованного под СТП вертикально-фрезерного станка SSS-400. Из-за отсутствия российских нормативных документов, регламентирующих НК СТП, одной из ключевых задач является выбор технологии оценки качества полученных соединений.

Целью исследования является практическая проверка эффективности различных методов НК для оценки качества сварных соединений алюминиевых сплавов, полученных СТП. В ходе проведенного литературного обзора выяснилось, что выбор методов НК существенно различается. В источнике [1] изучены возможности применения ультразвуковой дефектоскопии фазированными антенными решетками (УЗК с ФАР), вихретоковый метод (ВК) и тепловизионный контроль (ТК) в ходе сварки, а также металлографические исследования полученных структур. Установлено, что наиболее надежным методом, для

обнаружения дефектов (за исключением линии стыка), является УЗК с ФАР. Преимущество УЗК с ФАР подтверждается и в источниках [2,4]. В публикации [3] утверждается, что удалось определить дефект в виде “заглаженного” непровара, не обнаруженного визуально-измерительным контролем (ВИК), тремя методами: рентгенографическим (РК), УЗК и ТК. Результаты подтверждены металлографическими исследованиями.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

На момент публикации на также переоборудованном под СТП фрезерном станке 6В75 было получено несколько пробных образцов листа АМг2М толщиной 1,5 мм. Для полученных образцов опробованы часть методов контроля качества, выбранных в ходе литературного обзора: ВИК, Капиллярный контроль двумя методами: цветная дефектоскопия (ЦМ) и люминесцентный контроль (ЛЮМ-1ОВ), РК. Ввиду отсутствия требований нормативной документации к размерам сварных швов, выполненных СТП, на этапе ВИК проводилась проверка отсутствия наружных дефектов.

3. ВЫВОДЫ

1. Цветная дефектоскопия позволяет обнаружить непровары в корне, пропущенные при ВИК. Однако со стороны усиления шва контроль затруднителен из-за фона, вызванного большой шероховатостью поверхности.

2. Люминесцентный контроль позволил выявить не только непровары в корне, но и множество наружных дефектов. Преимущество люминесцентного метода по сравнению с цветной дефектоскопией оказалось не только в большей чувствительности контроля, но в отсутствии фона, вследствие лучшего удаления пенетранта на этапе очистки.

3. Радиографический контроль позволил выявить только непровар в корне. Требуется дальнейшая проверка выявляемости дефектов шва, типичных для СТП (несплавления по кромке и пр.), путем сравнения полученных радиографических пленок с данными металлографических исследований.

4. В ходе дальнейших исследований необходимо опробовать других вышеупомянутых методов НК: УЗК с ФАР, ВК и ТК. После получения достаточного количества сварных образцов предполагается проведение РОС-анализа эффективности различных методов неразрушающего контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рубцов В.Е., Тарасов С.Ю., Колубаев Е.А., Гнусов С.Ф. Использование методов неразрушающего контроля для диагностики дефектов в сварных швах, полученных сваркой трением с перемешиванием. Контроль. Диагностика. 2015. № 2. с. 51-58.
2. Рубцов В.Е., Колубаев Е.А., Тарасов С.Ю. Методика ультразвукового контроля сварных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием, с использованием технологии фазированной

- антенной решетки. Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия. Современные проблемы науки и образования. 2014. №6. с. 229.
3. *Филитов А.В., Тарасов С.Ю., Колубаев Е.А., Рубцов В.Е.* Определение дефекта в виде заглаженного непровара после сварки трением с перемешиванием при неразрушающем контроле. Фундаментальные исследования. 2015. № 6-2. с. 296-300.
 4. *Yoshihiko Uematsu, Ichinori Shigematsu, Yuichiro Yamamoto, Naoki Imai, Takahiko Nomura, Toshihiko Fukuda, Toshifumi Kakiuchi, Eisuke Kondoh.* Non-destructive inspection of welding defects in friction stir welds and prediction of their fatigue life. J-Stage. 2015. №30. с. 220-227.

ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА КАЧЕСТВО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

© 2020 г. Григорьев Егор Витальевич^{1*}, С.А. Перетятко^{1**}, П. С. Лапынин^{1***},
Е.С. Боровик^{1****}

Научный руководитель: д.т.н., профессор Носов Виктор Владимирович^{1*****}

¹ – Санкт-Петербургский горный университет, 199106 Санкт-Петербург, 21 линия д.2

* - Arshavin58@mail.ru; ** - sabperetyatko@gmail.com; *** - lapynin.pavel@mail.ru; **** - Borovikelisaveta@gmail.com; ***** - nosovvv@list.ru.

Прочность сварных соединений обеспечивается рядом комплексных мер, таких как мероприятия по уменьшению деформаций и напряжений на разных стадиях изготовления конструкции: до сварки — на стадии проектирования конструкции и технологии производства, во время и после сварки, а также соблюдением режимов и условий эксплуатации. Одним из вариантов повышения прочности сварного соединения является снятие локальных остаточных напряжений в сварном соединении, высокий уровень которых является одной из основных причин образования трещин [1]. Оценка остаточных напряжений без разрушения целостности сварного соединения производится рентгеновскими, акустическими, электромагнитными и другими методами. Однако, регистрируемые сигналы методов прохождения и отражения, вводимых извне волн, связаны с прочностью и процессом роста повреждений неоднозначно, поскольку упускают нано-масштабные факторы из-за огибания волнами прочностных аномалий. Необходимость контроля внутренних напряжений отдалена от задачи оценки качества и обеспечения ресурса, так как внутренние напряжения неоднозначно связаны с ресурсом. Целью данной работы является обоснование оперативного и неразрушающего метода контроля прочности на основе информационно-кинетического подхода к интерпретации результатов регистрации сигналов, проведённого на примере сварных соединений.

Исходя из предложенного подхода [2], сварные соединения состоят из структурных элементов, состояние которых определяет состояние всего объекта в целом. Структурные элементы разделяются на две категории: ответственных (с низкими значениями ω (зона «колокола»)), определяющих прочность и ресурс изделия, и остальных (с высокими значениями ω (зона хвоста)), связи которых являются слабыми и все равно разрушатся под действием внешней нагрузки. Предложенный способ позволяет разделять структурные элементы и оценить состояние как тех, так и других. Снятие остаточных напряжений с этих ответственных структурных элементов позволяет говорить об увеличении прочности и, в следствии чего, остаточного ресурса. Прочность структурного элемента определяется формулой 1.

$$\omega = \gamma \sigma / K T \quad (1)$$

где, γ – активационный объем (параметр нанотруктуры); σ – растягивающие напряжения на структурном элементе; K – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Был проведен эксперимент по оценке качества разнообразных упрочняющих технологий образцы которых подвергались статическому нагружению с постоянной регистрацией акустических сигналов [3]. Результаты эксперимента показывают, что распределение числа импульсов упрочненных образцов во времени имеет нетипичный вид. Происходит резкое затухание активности на этапе упругого разрушения, из-за того, что крупные элементы из зоны «хвоста» отзвучали и наблюдается плато. С точки зрения подхода что интерпретируется отрывом хвоста от колокола с дальнейшим смещением колокола в область малых значений ω (рис.1а). Общее распределение, которое имело колокол и хвост – разорвалось, т.е. упрочнение привело к тому, что среднепрочные элементы перешли в зону колокола. Данные сопоставления результатов эксперимента с результатами моделирования представлены на рисунке 1а, б. С помощью моделирования удалось добиться разрыва между колоколом и хвостом.

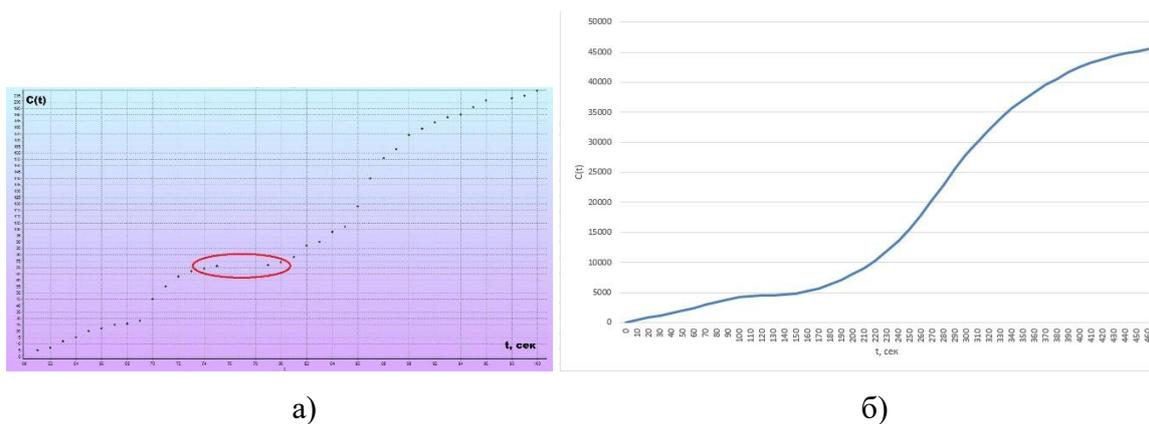


Рисунок 1. Результаты эксперимента (а) и моделирования (б)

Таким образом, совпадение результатов моделирования с данными результатов АЭ эксперимента при соблюдении пропорциональности показывают информативность предложенного подхода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов А.А., Летуновский А.П. Возможности оценки остаточных напряжений в сварных конструкциях // В МИРЕ НК. 2018. №1, т. 21, С. 60-62.
2. Носов В.В. Контроль прочности неоднородных материалов методом акустической эмиссии // Записки Горного института. 2017. Т. 226. С. 469-479.
3. Egor V. Grigoriev, Viktor V. Nosov. Quality control of hardening technologies using the acoustic emission method // Topical issues of rational use of natural resources: Scientific Conference Abstracts. Volume II. Saint-Petersburg Mining University. St. Petersburg, 2020. P. 219

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ОБЪЕМНОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

© 2020 г. Александр Вячеславович Ильинской^{1*},
Р.А. Егоров^{1**}, М.В. Кузьмичев^{1,2***}

¹ – Университет ИТМО, 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, д. 49, литер А

² – УН ИКЦ СЭКТ, 197343, Санкт-Петербург, ул. Матроса Железняка, д. 57, литер А

* - allill003@mail.ru; ** - roman1465@ya.ru; *** - kuzmichev.m92@gmail.com

Целью работы является оценка применимости метода контроля твердости металлических материалов, основанного на отношении работы, затрачиваемой на упругопластическую деформацию испытуемого материала, к объему восстановленного отпечатка.

Контроль механических характеристик занимает одно из основных мест при контроле качества изделий в целом на предприятиях – изготовителях ответственных изделий и узлов в различных отраслях промышленности.

Одним из видов контроля механических характеристик является контроль твердости материалов, различные методы которого получили широкую мировую известность. Стоит выделить повсеместно применяемые методы Бринелля, Роквелла, Виккерса и др. Суть приведенных методов твердометрии заключается в оценке конечных параметров внедрения инденторов различной формы в испытуемый материал. Стоит отметить, что особенностью представленных методов твердометрии является необходимость использования стационарного оборудования и изготовления специальных образцов-свидетелей при проведении испытаний.

Вместе с тем в настоящее время развиваются и методы индентирования, особенностью которых является оперативная оценка механических характеристик испытуемого материала. Одним из таких методов является метод динамического индентирования, основанный на анализе контактного ударного взаимодействия индентора с испытуемым материалом объекта контроля [1]. В существующем виде приборы динамического индентирования реализуют поверхностный метод контроля восстановленной твердости, который описан в ГОСТ Р 56474-2015 [2].

Внешний вид прибора динамического индентирования приведен на рис.1. Помимо датчика, прибор имеет специализированное программное обеспечение, которое представляет соответствующие результаты контроля в удобном для пользователя виде.

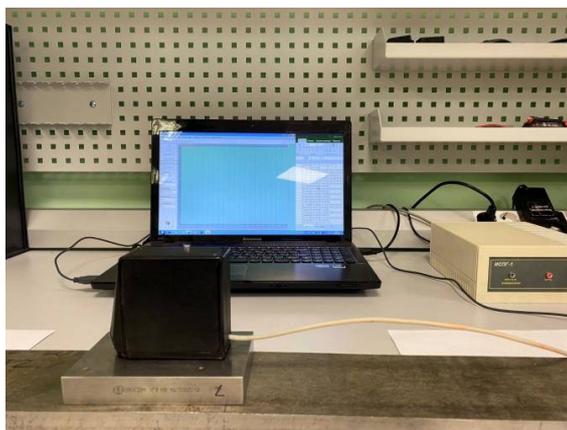


Рис.1 – Внешний вид прибора динамического индентирования

В настоящей работе при контроле твердости металлических материалов предлагается использовать метод динамического индентирования, основанный на отношении работы, затрачиваемой на упругопластическую деформацию испытуемого материала, к объему восстановленного отпечатка с учетом топографических эффектов.

Такой подход в литературе отмечают, как «объемный» или «энергетический».

В работе приведены результаты контроля твердости с использованием, как поверхностного метода в соответствии с ГОСТ Р 56474-2015 [2], так и «объемного» метода контроля при динамическом индентировании, а также их сравнительный анализ, который указал на возможность применимости объемного метода при контроле твердости металлических материалов динамическим индентированием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рудницкий В.А., Рабцевич А.В. Метод динамического индентирования для оценки механических характеристик металлических материалов // Дефектоскопия. – 1997. № 4. С. 79–86.
2. ГОСТ Р 56474-2015. Системы космические. Контроль неразрушающий физико-механических свойств материалов и покрытий космической техники методом динамического индентирования. Общие требования.

Аппаратная реализация метода динамического индентирования

Егоров Роман Александрович

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

Научный руководитель: Федоров Алексей Владимирович, д.т.н.

E-mail: roman1465@yandex.ru

В настоящее время, актуальной является задача по безобразцовому неразрушающему контролю физико-механических свойств материала изделия или его составных частей на стадии производства, испытаний и эксплуатации. Такой подход возможен при использовании измерительных приборов неразрушающего контроля портативного исполнения с автономным питанием. Однако портативное исполнение накладывает ограничения на применение приборов, реализующих различные стационарные методы неразрушающего контроля физико-механических характеристик материала изделия.

Одним из методов неразрушающего контроля, обладающим достаточно большой универсальностью и позволяющим проводить неразрушающие испытания широкого класса материалов: от металлов до низкомолекулярных полимеров и композитов, является метод динамического индентирования (ДИ). Развитие вычислительных средств и элементной базы позволяет конструировать портативные измерительные приборы, не уступающие по точности стационарным приборам инструментального индентирования.

Исследованию вопросов, связанных с оценкой механических характеристик металлов методом динамического индентирования посвящены работы следующих авторов: Рудницкий В.А., Крень А.П., Рабцевич А.В., К. Herrmann, R. T. Mennicke, H.M. Rockwell, R.E. Chinn, G.L. Kehl и др. Однако большинство исследований сосредоточено на совершенствовании методической части обработки результатов измерений. Алгоритмическое и программно-техническое обеспечения процессов обработки информативных сигналов и представление результатов в приборах и средствах контроля не получило должной проработанности. В связи с этим, в настоящее время, отсутствует отечественный аналог прибора динамического индентирования.

Целью работы является повышение точности определения механических характеристик металлов методом динамического индентирования. Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи по разработке:

- компьютерной модели процесса динамического индентирования;
- первичного преобразователя опытного образца прибора ДИ;
- алгоритма первичной обработки измерительных данных;
- аппаратной части измерительного блока;
- интерфейсного программного обеспечения.

Аппаратная часть опытного образца прибора состоит из измерительного блока с высокоскоростным аналого-цифровым преобразователем, первичного преобразователя, платы разработчика ПЛИС и модуля беспроводного интерфейса передачи данных на управляющий компьютер.

В работе рассматривается разработка аппаратной части измерительного блока динамического индентирования. Выходным сигналом с первичного преобразователя является ЭДС, пропорциональная скорости внедрения индентора в испытуемый материал. Электрический сигнал оцифровывается измерительным блоком с частотой дискретизации 40МГц и разрядностью в 12 бит и сохраняется в оперативную память ПЛИС. Проводится преобразование сигнала ЭДС в диаграммы изменения контактного усилия и внедрения ударника, несущие информацию о физико-механических характеристиках исследуемого материала. Алгоритмическая обработка и отображение результатов измерения проводится на управляющем компьютере. Основная часть алгоритма реализована в пакете прикладных программ MATLAB.

Производится сравнение результатов измерений с выходными данными зарубежного аналога разрабатываемого прибора и результатами компьютерного моделирования. В качестве первичного преобразователя используется преобразователь, входящий в состав прибора ДИ «ИСПГ-1», разработанного в ИПФ НАН Беларуси.

Результатом разработки является работоспособный прототип прибора динамического индентирования, позволяющий получать диаграммы изменения контактного усилия и внедрения ударника датчика.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ И СПОСОБА ОБРАБОТКИ СИГНАЛА ДИНАМИЧЕСКИХ ТВЕРДОМЕРОВ ПО ШКАЛАМ ЛИБА

© 2020 г. Автор: Голев Артём Сергеевич^{1*}

Научный руководитель: д.т.н. Гоголинский Кирилл Валерьевич^{1**}

¹ – Санкт-Петербургский горный университет, 199106 Санкт-Петербург,
Васильевский остров, 21 линия дом 2

*artemgolev1999@gmail.com; ** nanoscan@yandex.ru

Твердометрия, как вид неразрушающих измерений, широко применяется на всех этапах технического производства. При входном контроле сырья или заготовок, в процессе термической обработки материалов или монтажных работах и при эксплуатации изделий. Наиболее актуальным вопросом в этом направлении сегодня является развитие портативных твердомеров, позволяющих проводить оперативные измерения непосредственно на объекте контроля (далее ОК) [1]. К таким портативным твердомерам относятся твердомеры, реализующие динамический метод Либа [2].

В соответствии с [3] при измерениях твердости по методу Либа падающий нормально к поверхности исследуемого материала ударник сталкивается с поверхностью и отскакивает. Скорость ударника измеряют до и после соударения. Отношение скорости отскока ударника к скорости удара определяет твердость HL по шкалам Либа.

Особенностью метода Либа по сравнению со статическими шкалами твердости (Бринелля, Роквелла и Виккерса) является тот факт, что значения твердости HL зависят от значений упругих и пластических свойств материалов. Числа твердости по шкалам HL можно сравнить со стандартизованными шкалами Бринелля HB, Роквелла HR и Виккерса HV только через экспериментальные зависимости, основанные на сравнении для конкретных видов материалов. Для неизвестных материалов или материалов без таких зависимостей невозможно произвести сравнение значений по шкалам HL со значениями по шкалам HB, HR или HV. Кроме того, в рамках существующего подхода невозможно получить количественную информацию об упругих (модуль Юнга) и пластических (предел текучести) свойствах материала ОК.

Для повышения информативности метода динамической твердости предложена идея непрерывного измерения зависимости скорости ударника от времени при проведении измерений [4], в отличие от метода Либа, где информативными параметрами являются скорость удара и скорость отскока. Этот метод, по аналогии с методом инструментального индентирования [5], предлагается назвать динамическим методом инструментального индентирования.

Измерив зависимость скорости от времени в процессе удара, путём численного дифференцирования, можно получить зависимость ускорения от времени, а зная массу ударника, вычислить зависимость силы взаимодействия ударника с ОК от времени. Осуществив численное интегрирование, можно получить зависимость глубины внедрения ударника в поверхность ОК от времени. Построенная по полученным данным зависимость силы от глубины внедрения позволяет вычислять свойства материала ОК.

Для решения этой задачи необходимо оптимизировать конструкцию первичного измерительного преобразователя (ПП) твердомера и способ получения сигнала.

Задачами оптимизации являются:

- обеспечение линейности зависимости измеряемой ЭДС от скорости ударника путем изменения взаимного расположения катушки индуктивности и магнита в ударнике для получения максимума ЭДС в момент соударения бойка с ОК;

- устранение влияния вихревых токов, воздействующих на сигнал ПП путём замены металлической направляющей трубки и упорного кольца на неметаллические;

- анализ и устранение источников электромагнитных шумов, влияющих на измерительный сигнал.

В данной работе представлена и подробно описана новая конструкция ПП, удовлетворяющая таким требованиям, как линейность измеряемого сигнала и отсутствие вихревых токов. Также приведены основные соотношения и зависимости для реализации предлагаемого метода измерения не только поверхностной, но и объемной твердости, величина которой связана с удельной энергией пластической деформации материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Gogolinskii K.V., Syasko V.A., Umanskii A.S., Nikazov A.A. and Bobkova T.I.* Mechanical properties measurements with portable hardness testers: advantages, limitations, prospects. 2019 Journal of Physics Conference Series 1384:012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1384/1/012012>

2. New dynamic method for hardness testing of metallic materials, VDI-Report No. 308, pp 123-128, 1978.

3. ISO 16859-1:2015, Metallic materials — Leeb hardness test — Part 1: Test method, MOD.

4. *Рудницкий В.А., Крень А.П., Ланцман Г.А.* Оценка пластичности металлических материалов методом динамического индентирования // Литье и металлургия. 2017. №2. С. 81–87.

5. *Oliver W. C., Pharr G. M.* A new improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and sensing indentation experiments // J. of Mater. Res. — 1992. — 7, No. 6. — P. 1564—1582.

Геотехнический мониторинг вечномерзлых грунтов

© 2020 г. **Александр Игоревич Шихов^{1*}**, научный руководитель **В. А. Сясько^{1**}**

¹ – Санкт-Петербургский Горный Университет, 199106, 21-я линия В.О., № 2

* - shihov-gol@mail.ru; ** - 9334343@gmail.com

Результаты проведенных мониторинговых исследований среднегодовой температуры атмосферного воздуха в районах распространения вечномерзлых грунтов показывают, что тренд повышения температуры воздуха имеет устойчивый рост. В результате повышения температуры изменяются деформационные свойства вечномерзлых грунтов. Данные изменения приводят к оседанию зданий и сооружений, разрывам трубопроводов и т.д. [1]

В сложившейся ситуации усиливается роль геотехнического мониторинга. Несмотря на наличие значительного количества методов и средств проведения геотехнического мониторинга, количество аварийных ситуаций, за последние десятилетия, только увеличивалось. Поэтому разработка новых способов геотехнического мониторинга является актуальной задачей.

Решением проблемы может являться применение временного метода акустического контроля. Определяя время и рассчитывая скорость распространения упругих волн в массиве грунтов, возможно вычислить динамический модуль упругости грунтов:

$$E_d = V_p^2 \cdot \rho \cdot (1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu) / (1 - \mu),$$

где V_p - скорость распространения продольной волны; ρ - плотность грунта; μ - коэффициент Пуассона.

Однако, E_d характеризует упругие или обратимые деформации грунтов, тогда как при проектировании зданий и сооружений используется модуль общей деформации грунтов, характеризующий полные деформации [2]. Поэтому для оценки изменения свойств вечномерзлых грунтов в период эксплуатации сооружения необходимо установить корреляционную зависимость между E_d и модулем общей деформации грунтов E_o :

$$E_o = f(E_d).$$

Эту зависимость можно установить следующим образом. В специально подготовленную измерительную скважину опускается баллонный прессиометр с установленным внутри низкочастотным излучателем со сферическим контактом рис.1, а. В камере прессиометра компрессор создает давление, в результате чего камера расширяется и обжимается на стенки скважины, после этого выполняется измерение модуля общей деформации грунтов согласно [3]. Так как модуль общей деформации грунтов зависит от величины нагрузки, то при достижении проектной величины нагрузки

на грунты, на низкочастотный излучатель подается сигнал возбуждения волны и может быть выполнено измерение времени распространения продольной волны в массиве грунта при нескольких положениях приемного преобразователя.

При проведении геотехнического мониторинга рис. 1, б выполняются измерения времени распространения t_i продольной волны при соответствующем расположении излучателя (по глубине) и приемника (по длине), после чего по корреляционным зависимостям $E_{oi} = f(E_{di})$ определяется изменение деформационных свойств вечномерзлых грунтов. В качестве критерия оценки деформационных свойств вечномерзлых грунтов применяется теория предельно-напряженного состояния грунтов.

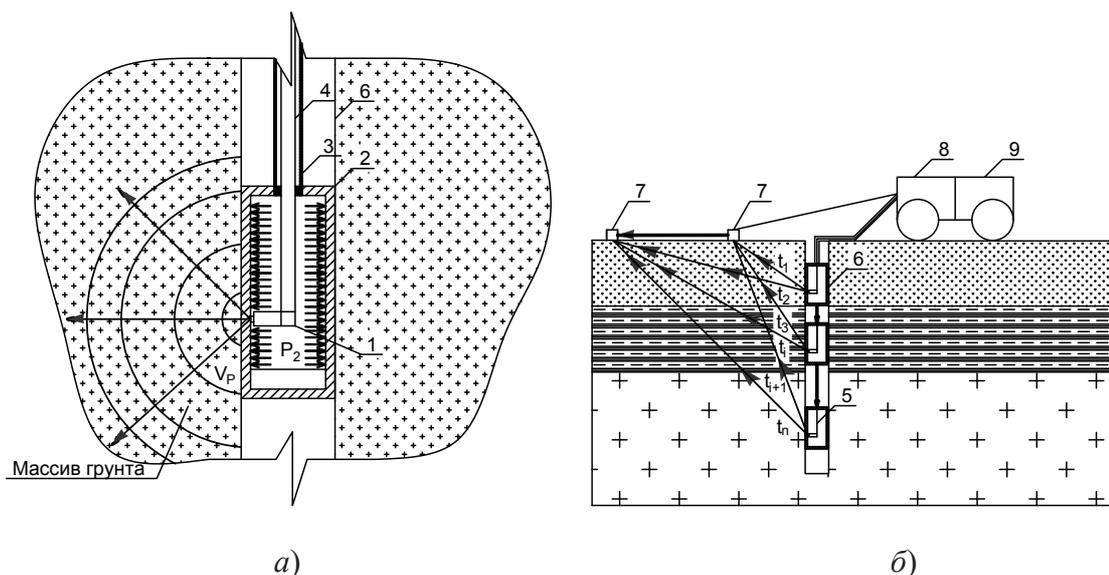


Рисунок 1. Схема проведения измерений деформационных свойств вечномерзлых грунтов.

1 – низкочастотный излучатель с сферическим контактом; 2 – полиуретановая камера; 3 – трубопровод сжатого воздуха; 4 – геофизический кабель; 5 – баллонный прессиометр с низкочастотным излучателем 1; 6 – измерительная скважина; 7 – низкочастотный приемник; 8 – компрессор; 9 – устройство для измерения времени распространения продольной волны; t_1, t_2, t_3, t_i, t_n – время распространения продольной волны в каждом положении; V_p – продольная волна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н. Результаты 35-летних мониторинговых исследований криолитозоны на стационаре «Чабыда» (Центральная Якутия) // Наука и образование. 2017. №2. С. 65-73.
2. 2017 СП 305.1325800.2017 Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве (АО «НИЦ» Строительство) - НИИОСП им. Н.М. Герсевича, ЗАО «Триада-Холдинг».
3. 2012 ГОСТ 20276-2012 Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости (АО «НИЦ» Строительство) - НИИОСП им. Н.М. Герсевича, ЗАО «Триада-Холдинг».

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОСНАСТКИ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЗАГОТОВОК ИЗ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2020 г. Колганов Олег Александрович^{1*}, А.В. Фёдоров^{1**}

¹ – Университет ИТМО, Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101

* - kolganoff2014@yandex.ru; ** - afedor62@yandex.ru;

В различных отраслях промышленности и народного хозяйства таких, как авиастроение, ракетостроение, металлургия, промышленность, машиностроение, медицина и др. к ответственным изделиям предъявляются высокие требования надежности. Одним из перспективных решений является применение новых материалов. Все большую популярность приобретают композитные материалы и углепластики. Широкое применение в этих отраслях нашел углерод-углеродный композиционный материал (УУКМ). Из этого материала изготавливают различные детали, имеющие как простую, так и сложную геометрическую форму. УУКМ - это новый класс конструкционных материалов, предназначенных для создания теплонагруженных деталей, которые используются в авиации и ракетостроении, машиностроении и др. Они обладают уникальной способностью сохранять высокую прочность и жесткость при температурах до 2500°С, а нанесение систем барьерных и антиокислительных покрытий обеспечивает работоспособность таких композитов и в окислительной среде. На сегодняшний день главной задачей, связанной с изготовлением деталей из УУКМ, является обеспечение контроля качества на этапе производства.

Целью данной работы является разработка технологической оснастки для контроля качества заготовок из УУКМ нового поколения используя ультразвуковой (УЗ) метод контроля.

Задачи:

- Анализ методов и схем контроля качества заготовок из УУКМ в УЗ теновом режиме.
- Анализ существующих технических решений обеспечивающие УЗ контроля качества заготовок из УУКМ в теновом режиме.
- Проектирование автоматизированной оснастки для обеспечения тарированного прижима датчика при контроле качества заготовок из УУКМ в УЗ теновом режиме.

Одной из основных проблем контроля качества изделий из УУКМ является разработка технологий НК контроля качества структуры и сплошности заготовок деталей, которые позволяли бы выявлять следующие типы дефектов: области пониженной плотности, трещины, расслоения и крупные поры и др. С учетом особенностей контролируемых изделий приемлемым рассматривается акустический теновой метод контроля. Эффективность акустического тенового метода обеспечивается корректным выбором параметров контроля и техническими решениями, заложенными в технологическую оснастку.

Теневой метод ультразвукового контроля предполагает размещение излучающего и приемного преобразователей по разные стороны объекта контроля или контролируемого его участка. При проведении УЗК теньевым методом, необходимо обеспечить выполнение следующих требований: перпендикулярность к поверхности ОК; стабильный тарированный прижим силиконовых протекторов преобразователей к поверхностям объектов контроля; соосное расположение излучателя и приёмника.

В результате НИР был проведён анализ: методов и схем контроля качества заготовок из УУКМ в УЗ теньевом режиме; существующих технических решений обеспечивающие УЗ контроля качества заготовок из УУКМ в теньевом режиме. На основе полученных данных была разработана и изготовлена технологическая оснастка для контроля качества заготовок из УУКМ нового поколения представленная рисунке 1.

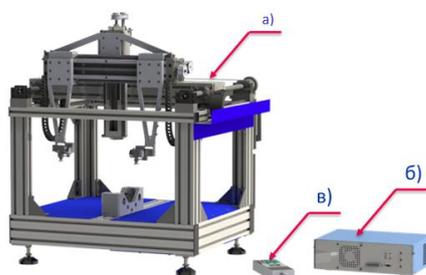


Рисунок 1 – Автоматизированная оснастка: а) система позиционирования; б) блок управления; в) пульт управления

По результатам, полученным в ходе экспериментальной отработки, установлено, что разработанная автоматизированная оснастка позволяет производить неразрушающий контроль (НК) используя УЗК в теньевом режиме с высокой степенью точности.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Троицкий В. А., Карманов М. Н., Троицкая Н. В. Неразрушающий контроль качества композиционных материалов //Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2014. – №. 3. – С. 29-33.
- 2 Щепетов, А.Г. Основы проектирования приборов и систем : учебник и практикум / А.Г. Щепетов. – М.: Издательство Юрайт, 2019. – 458 с.
- 3 Кормильцева, М. Ф. Обоснование информативных параметров ультразвукового контроля углерод-углеродных композиционных материалов / М. Ф. Кормильцева, Ю. В. Левкова // Технология машиностроения. - Москва, 2018. - 11 (197). - С. 49—55.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ НОРМАТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ АТТЕСТАЦИИ ЛАБОРАТОРИЙ И ПЕРСОНАЛА В ОБЛАСТИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Автор: Леонтьук Светлана Михайловна^{1*}

Научный руководитель: д.т.н. Гоголинский Кирилл Валерьевич^{1**}

¹ – Санкт-Петербургский горный университет, 199106 Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия дом 2

*svetaleontyuk90@gmail.com; **nanoscan@yandex.ru

*8 931 313 34 97; **8 911 971 92 63

Цель научно-исследовательской работы: предложить систему, которая в рамках действующего законодательства позволила бы обеспечить качество работы персонала и лабораторий в области неразрушающего контроля и технической диагностики опасных производственных объектов.

До настоящего времени неразрушающий контроль (НК) в рамках деятельности в области промышленной безопасности, включая экспертизу промышленной безопасности, осуществлялся на основании следующих взаимосвязанных нормативно-правовых документов и в системе добровольной сертификации (рис.1).

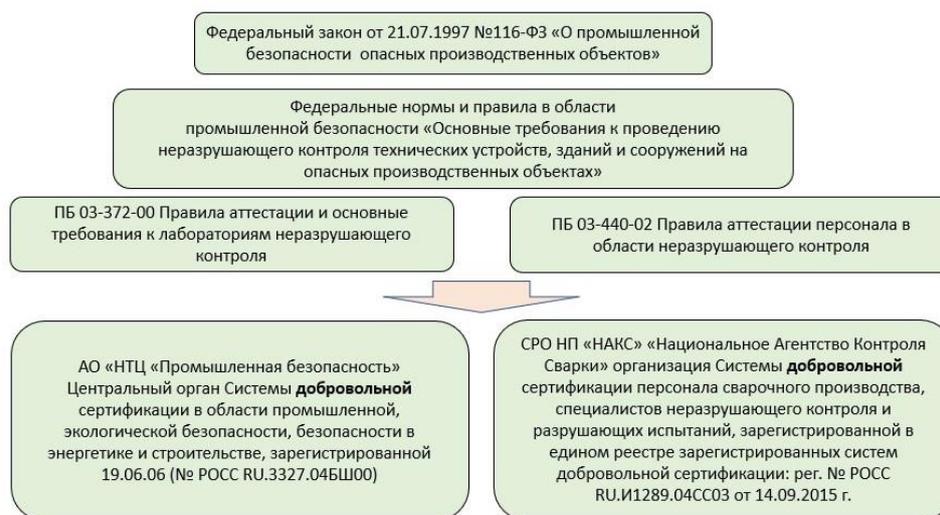


Рис. 1 – Система нормативного регулирования в области неразрушающего контроля опасных производственных объектов, действующая до 01.01.2021

В рамках проходящей «регуляторной гильотины» в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 6 августа 2020 года N 1192 ряд документов признаны утратившими силу с 1 января 2021 г. Это привело к риску образования правового вакуума в области промышленной безопасности вообще и НК на ОПО в частности, это означает, что исчезнут формальные критерии выбора исполнителей для проведения диагностирования ОПО.



Рис.2 - Система нормативного регулирования в области неразрушающего контроля опасных производственных объектов, прогнозируемая после 01.01.2021

В сложившихся обстоятельствах система аттестации специалистов и аккредитации лабораторий НК в области промышленной безопасности должна быть построена на новых принципах в соответствии с действующим законодательством. Решением может являться сценарий, когда функции аттестации лабораторий и персонала НК перейдут от добровольной системы сертификации, реализуемой коммерческими организациями к государственным структурам. В частности, аттестация испытательных лабораторий, в том числе лабораторий НК, может трансформироваться в аккредитацию в Росаккредитации, а аттестация персонала перейдет в Минтруд и Национальное Агентство Развития Квалификаций (НАРК) (рис.2).

В рамках действующего законодательства может быть рассмотрен вариант делегирования полномочий по оказанию услуг, связанных с аттестацией лабораторий и специалистов по неразрушающему контролю (НК), оказывающим данные услуги в настоящее время частым (приватизированным) структурам в рамках соглашений о государственно-частном партнёрстве (ГЧП).

В рамках зарубежного опыта может быть рассмотрено номинирование организаций, в том числе негосударственных на осуществление деятельности надзора и контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Федеральный закон от 21.07.1997 №116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».*
2. *ФНиП в «Основные требования к проведению неразрушающего контроля технических устройств, зданий и сооружений на опасных производственных объектах».*
3. *ПБ 03-440-02 «Правила аттестации персонала в области неразрушающего контроля».*
4. *ПБ 03-372-00 «Правила аттестации и основные требования к лабораториям неразрушающего контроля».*

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ СИМУЛЯТОРА ДЕФЕКТΟΣКОПА

© 2020 г. Речкина Лиана Андреевна^{1*}, Федяев Дмитрий Валерьевич^{1**}, Давыдкин Андрей Васильевич^{1***}

¹ – ФГБОУ ВО «Петербургский университет путей сообщения Императора Александра I», 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

* - lianarechkina@yandex.ru +7(900) 633-54-87; ** - dfedyaev4@gmail.com +7(921) 423-36-45; *** - davydkin@list.ru +7(981) 808-29-00

Сегодня, в условиях бушующей в мире пандемии коронавируса, приобрела особую остроту и актуальность проблема дистанционного обучения. Восприятие теоретического материала не вызывает особых вопросов, так как преподаватели предоставляют доступ к конспектам лекций при помощи платформ дистанционного обучения, в том числе и видеоресурсы, позволяющие проводить онлайн-встречи преподавателей и студентов, исключив их личный контакт и скопление большого количества людей в одном месте. Практическое же применение теоретических знаний таким образом реализовать не так просто. Необходима разработка специальных программ.

Решением проблемы усвоения студентом практического материала, а именно получения навыка работы с дефектоскопом, возможно следующими способами.

Первый способ реализуется при помощи встроенного в дефектоскоп программного обеспечения, которое позволяет передать полный вид экрана дефектоскопа на компьютер. Тогда, используя видеоресурсы, преподаватель может объяснить основные практические аспекты работы с прибором, непосредственно работая с реальным дефектоскопом. Студенты же будут видеть все результаты и процесс контроля на своих мониторах, что позволит увеличить наглядность и восприимчивость преподаваемого материала.

Второй способ реализации – использование полноценного компьютерного симулятора дефектоскопа, работая в котором студенты, по примеру или под руководством преподавателя, получают необходимые, возможно лишь базовые и условные (в зависимости от проработки симулятора), но все же практические знания о работе с прибором.

Таким образом, целью данной работы является разработка и применение в учебном процессе симулятора дефектоскопа. Суть проблемы, как описано выше, состоит в сравнении двух вариантов реализации удаленной работы с дефектоскопом, оценки плюсов и минусов каждого из вариантов и выбор оптимального из них, в качестве вывода. Результаты данной работы, представленные в медиа-варианте будут продемонстрированы на конференции, а также предложен прототип дефектоскопа УД2-70, разработанный на языке VBA (Visual Basic for Applications) в программе Microsoft Excel.