



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



УрО РАН



ИМАСШ УрО РАН



ОПОРА РОССИИ

---

**ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**  
**XXXV Уральской конференции с**  
**международным участием**  
**ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ**  
**НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**  
**(ЯНУСОВСКИЕ ЧТЕНИЯ)**

13-14 марта 2024 г.

---

Екатеринбург

2024

## **Физические методы неразрушающего контроля**

### **(Янусовские чтения)**

Тезисы докладов XXXV Уральской конференции с международным участием

г. Екатеринбург, 2024

#### **ПРЕДСЕДАТЕЛЬ ОРГКОМИТЕТА**

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

#### **УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ КОНФЕРЕНЦИИ**

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

#### **РУКОВОДИТЕЛЬ МОЛОДЕЖНОЙ СЕКЦИИ**

Мушников А. Н., к.т.н., ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург

#### **ЧЛЕНЫ ОРГКОМИТЕТА**

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

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

Крёнинг Х.-М. В., профессор, Саарский университет, г. Саарбрюкен, Германия

Михайлов Л. В., ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург

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

Ринкевич А. Б., член-корр. РАН, д.ф.-м.н., ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург

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

Сясько В. А., профессор, д.т.н., президент РОНКТД, г. Санкт-Петербург

#### **Место проведения конференции:**

г. Екатеринбург, Международный выставочный центр «Екатеринбург-Экспо».

## СОДЕРЖАНИЕ

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ ПЕРЕДОВЫХ СРЕДСТВ НК, МС и ТД НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНТЕРНЕТ-ТЕХНОЛОГИЙ	8
В. А. Сясько	
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ТЕПЛООВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В ТОМСКОМ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ	10
В. П. Вавилов, А. О. Чулков, Д. Ю. Кладов	
УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕФЕКТОМЕТРИЯ: ОТ СПЕКТРАЛЬНОГО ОБРАЗА ДО КОГЕРЕНТНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОРТРЕТА ДЕФЕКТОВ	12
А. Х. Вopilкин	
ВОПРОСЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ТОНКИХ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ НА ПРИМЕРЕ ЛИСТОВ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА	15
О. В. Муравьева, А. В. Блинова, Л. А. Денисов	
ОЦЕНКА НЕОДНОРОДНОСТИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЦИЛИНДРАХ ГЛУБИННО-ШТАНГОВОГО НАСОСА	17
В. В. Муравьев, А. С. Хомутов, К. А. Торхов, Е. А. Степанова, В. Д. Попова	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ГОЛОВКИ РЕЛЬСОВ В ПУТИ	19
А. Л. Бобров, К. И. Гончаров, С. П. Шляхтенков, И. К. Тыштыкова	
АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ УГЛЕПЛАСТИКА НАКЛАДНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ	21
А. Л. Бобров, Е. А. Куклина	
ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ СРЕДСТВАМИ ТЕНЗОМЕТРИИ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ТЕПЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ	23
С. А. Бехер, А. А. Попков, В. В. Выплавень, М. А. Гуляев, С. П. Шляхтенков	
ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ ПО МАГНИТНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ	25
А. Н. Сташков, Е. А. Щапова, А. П. Ничипурук, Н. В. Гордеев, А. М. Матосян	
СОЧЕТАНИЕ ДАННЫХ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ	27
Н. В. Крысько, С. В. Скрынников, А. Г. Кусый	
НЕРАЗРУШАЮЩИЙ СПОСОБ КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕПЛООБМЕНА И ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ	29
Е. В. Гарнышова, Е. В. Измайлова	
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	31
Е. В. Измайлова, Е. В. Гарнышова	

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ГАЗОПРОВОДА В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА СТЕНКУ ТРУБЫ	33
Н. Ю. Трякина, С. В. Трапезников, А. С. Саломатин, С. С. Кукушкин, Я. Г. Смородинский, В. Н. Костин, О. Н. Василенко, А. В. Михайлов	
ОСОБЕННОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ В КОМБИНИРОВАННЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ СТАЛЕЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	35
В. А. Барат, А. Ю. Марченков, В. В. Бардаков, С. В. Ушанов, Е. А. Лепшеев, Г. Б. Свиридов	
АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ КОНЪЮНКТИВНОГО И ДИЗЪЮНКТИВНОГО СИНТЕЗА ДЛЯ АНАЛИЗА ГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ОДНИМ ИЛИ НЕСКОЛЬКИМИ МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ	37
В. Ю. Шпильной, Д. А. Дерусова, К. Р. Беликов	
ИНФРАКРАСНАЯ ТЕРМОГРАФИЯ КОРУНДОВЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАСТИН	39
С. Е. Черных, В. Н. Костин, Ю. И. Комоликов	
ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФОРМЫ ДЕФЕКТА ФЕРРОМАГНИТНОЙ ПЛАСТИНЫ ПУТЕМ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ МАГНИТОСТАТИКИ И СЕРИИ ПРЯМЫХ ЗАДАЧ	41
А. В. Никитин, Л. В. Михайлов, А. В. Михайлов, Ю. Л. Гобов, В. Н. Костин, Я. Г. Смородинский	
ОПТИМИЗАЦИЯ НАМАГНИЧИВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДЕФЕКТΟΣКОПА БУРИЛЬНЫХ ТРУБ	43
Л. В. Михайлов, Ю. Л. Гобов, А. В. Михайлов, А. В. Никитин, Я. Г. Смородинский, В. Н. Костин	
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ	45
А. С. Голев, К. В. Гоголинский, К. И. Доронин, А. С. Уманский	
ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ГРАДУИРОВКИ И ПОВЕРКИ ДВУХПАРАМЕТРОВЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ТОЛЩИНОМЕРОВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ	47
М. В. Сясько, И. П. Соловьев, П. В. Соломенчук	
НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ДИФРАКТОМЕТРЕ «СТРЕСС»	49
И. Д. Карпов, В. Т. Эм	
ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ТРАДИЦИОННЫХ И АДДИТИВНЫХ ПРОИЗВОДСТВ МЕТОДАМИ НЕЙТРОННОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ	51
М. М. Мурашев, В. Т. Эм, В. П. Глазков	
СВЯЗЬ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТАЛЕЙ, ИМЕЮЩИХ РАЗМЕРНОСТЬ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, С ПАРАМЕТРАМИ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЕТЛИ ИХ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА	52
С. Г. Сандомирский	

РЕЗУЛЬТАТ МОДЕЛИРОВАНИЯ БЕЗГИСТЕРЕЗИСНОЙ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ МАГНИТНОГО СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА	54
С. Г. Сандомирский	
ХАРАКТЕРИСТИКИ УПРУГИХ ВОЛН В ОБЛАСТИ ГРАНИЦЫ КОНСОЛИДИРОВАННОЙ СРЕДЫ	56
К. Е. Аббакумов, А. Бунаков, И. Г. Сидоренко	
УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ГИПОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА РАЗЛИЧНЫЕ БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ С ЦЕЛЬЮ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ	58
М. С. Емельянова, В. В. Муравьев	
ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДЕМПФЕРА ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕГО ФОРМЫ	60
М. С. Вечёра, С. И. Коновалов, Р. С. Коновалов, I V. Ch., В. М. Цаплев	
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОРАЗРЯДНОМ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ	62
В. О. Нехорошев, Д. А. Дерусова, В. Ю. Шпильной	
КОНТРОЛЬ УГЛЕРОДНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В ОТХОДАХ ТОПЛИВНО- ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КЛАСТЕРА	64
В. В. Мирошников, Н. В. Гречишкина, А. А. Неделько	
ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ МОЛОДЕЖНОЙ ШКОЛЫ	66
МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В АНАЛИЗЕ ДАННЫХ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ В ВИДЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ	67
А. В. Шевченко, Н. В. Крысько	
ТЕПЛОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ЛИНЕЙНОМ СКАНИРОВАНИИ	69
А. О. Чулков, В. П. Вавилов, Д. Ю. Кладов	
ВЛИЯНИЕ ШИРИНЫ РАССЛОЕНИЙ В СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЯХ НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ПРИ АКТИВНОЙ ТЕРМОГРАФИИ	71
Ю. А. Захаров	
ОЦЕНКА ВРЕМЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СТАЛИ ПО ПАРАМЕТРАМ ГАРМОНИЧЕСКОГО СПЕКТРА КРИВОЙ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ	73
Р. А. Соколов, К. Р. Муратов	
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО КОНТРОЛЯ ПОКРЫТИЙ ТРУБ В ПОТОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ	75
Д. И. Антонов, В. А. Сясько, А. С. Мусихин, М. С. Степанова	
МАГНИТОАКУСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЦЕНКИ АНИЗОТРОПИИ СПЛАВА НИКЕЛЬ-ЖЕЛЕЗО	77
В. Н. Перов, Е. Д. Сербин, В. Н. Костин, Л. В. Михайлов	

МОНИТОРИНГ ИЗМЕНЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ НА ИЗГИБ ОБРАЗЦОВ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ	79
А. В. Кочнев, М. Б. Ригмант, М. К. Корх, Н. В. Гордеев, А. М. Матосян	
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТНОСТИ ЛИСТОВОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ ВОЛНАМИ ЛЭМБА	81
А. В. Васильев, Д. Ю. Бирюков, А. Ф. Зацепин	
СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ДЕТЕКТОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3-δ</sub> ДЛЯ НЕЙТРОННОЙ ДОЗИМЕТРИИ	83
А. И. Бояринцев, Р. М. Абашев, А. Д. Петракович, И. И. Мильман, А. И. Сюрдо	
МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТЕРМООБРАБОТАННОЙ И ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННОЙ СТАЛИ 38ХС	85
А. М. Матосян, А. Н. Сташков, А. П. Ничипурук, Е. А. Щапова, Е. Ю. Сажина, Н. В. Гордеев, С. В. Афанасьев	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ В АСИММЕТРИЧНОМ ЦИКЛЕ «КОЭРЦИТИВНЫЙ ВОЗВРАТ-НАМАГНИЧИВАНИЕ»	87
Д. Г. Ксенофонтов, О. Н. Василенко, В. Н. Костин, Н. П. Лукиных	
МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА СТАЛИ 09Г2С ПОСЛЕ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА ИЗГИБ	89
Н. В. Гордеев, А. Н. Сташков, А. М. Матосян, М. К. Корх, Д. А. Шишкин, И. Г. Ширинкина	
ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ЦЕМЕНТАЦИИ СТАЛЕЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ГРАДУИРОВОЧНЫХ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ВИХРЕТОКОВОГО СТРУКТУРОСКОПА	91
А. В. Бызов, О. Н. Василенко, Д. Г. Ксенофонтов, В. М. Завьялов	
ИЗМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРУБ ПРИ ГИДРО- И ПНЕВМО-ИСПЫТАНИЯХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ	93
К. Е. Мызнов, О. Н. Василенко, В. Н. Костин, В. С. Тронза, А. Н. Бондина, С. С. Кукушкин, Н. Ю. Трякина	
ОПТИМИЗАЦИЯ МЕСТ РАСПОЛОЖЕНИЯ ДАТЧИКОВ ПОЛЯ И ПОТОКА В ПРИСТАВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ МАГНИТНЫХ СТРУКТУРОСКОПОВ	95
А. В. Батуева, В. Н. Костин, О. Н. Василенко	
МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ РОБОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОКРЫТИЙ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ	97
М. С. Губин, В. В. Малый, А. В. Федоров, И. Ю. Кинжагулов	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЖЕСТКОСТИ СЦЕПЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ПЕРЕДАЧУ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СИГНАЛА	99
А. В. Костерина, А. В. Теплякова	

<p>ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ДИНАМИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧЕГО ТЕЛА И ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЕГО СВОЙСТВ</p> <p>В. С. Выплавень, С. А. Бехер</p>	101
<p>ОЦЕНКА АКУСТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ В ОБРАЗЦЕ, ПОЛУЧЕННОМ МЕТОДОМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ</p> <p>А. Л. Владыкин</p>	103
<p>ОПТИМИЗАЦИЯ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРИБОРА ДИНАМИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМИ КАТУШКАМИ ИНДУКТИВНОСТИ</p> <p>О. А. Колганов, А. В. Фёдоров</p>	105
<p>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОПОР ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПО ИХ ДИНАМИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ</p> <p>А. Н. Кожевников, Т. В. Бурнышева, П. В. Ласточкин</p>	107
<p>ВЛИЯНИЯ ДВУХОСНОГО МЕХАНИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ПРУЖИННОЙ СТАЛИ 65Г НА ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ГАРМОНИЧЕСКОГО СПЕКТРА, ПОЛУЧЕННОГО ПО ПЕТЛЕ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА</p> <p>И. С. Малахов, Р. А. Соколов, К. Р. Муратов</p>	109
<p>АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ НА БАЗЕ «ЛАЗЕР-КАМЕРА» ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛОПРОКАТА</p> <p>В. В. Коняшов, А. С. Сергеев, О. А. Колганов</p>	111
<p>ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПЛАСТИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ</p> <p>Т. С. Абрамова</p>	113
<p>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ</p> <p>А. М. Шмаков, А. В. Федоров</p>	115
<p>ПРИМЕНЕНИЕ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ЗАТВОРА ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ</p> <p>Р. Н. Александров, И. И. Ключкин, А. Р. Загретдинов, Ш. Г. Зиганшин</p>	117
<p>РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ</p> <p>В. В. Малый, М. С. Губин, А. В. Федоров, И. Ю. Кинжагулов</p>	119

# МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ ПЕРЕДОВЫХ СРЕДСТВ НК, МС и ТД НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНТЕРНЕТ-ТЕХНОЛОГИЙ

© 2024 г. Владимир Александрович Сясько<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> – ФГУП "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева", 190005 Санкт-Петербург,  
Московский пр., д. 19

\* - 9334343@gmail.com

Представлен сравнительный анализ ключевых элементов современных тенденций цифровой трансформации умных производственных процессов и инфраструктурных объектов, методов (технологий) и средств измерений, методов и средств испытаний, а также методов и средств неразрушающего контроля, мониторинга состояния и технической диагностики на основе использования Интернет-технологий. Рассмотрены вопросы обеспечения автономной работы и долговременной стабильности метрологических характеристик оборудования, используемого в непрерывных производственных процессах, исключая его ручную настройку и калибровку, построенного с использованием интеллектуальных измерительных преобразователей, облачных технологий и технологий обработки больших данных на основе адекватных цифровых четырехуровневых моделей (цифровых двойников) «измерительный преобразователь – объект управления», обеспечивающих единое информационное и физическое пространство для распределенных производственно-технологических процессов. Показано состояние общих вопросов метрологического обеспечения и стандартизации в рамках принципа «сквозное цифровое проектирование» как всей цепочки создания стоимости продукта, так и связанной с ним производственной системы.

Сформулированы актуальные цели и задачи в области стандартизации принципов построения, применения и сертификации средств НК, МС и т.п., обеспечивающие их единство со стандартами, разрабатываемыми в рамках развития современных отраслей (например, в рамках стратегической инициативы «ИНДУСТРИЯ 4.0» и аналогичных государственных программ), которые, среди прочего, должны обеспечить единство общих характеристик интерфейсных модулей и форматов данных измерительных преобразователей для создания сетей датчиков различного назначения «умных заводов».

Ключевым элементом этих систем должны стать интеллектуальные измерительные преобразователи – адаптивные датчики (первичные измерительные преобразователи + виртуальные вторичные измерительные преобразователи, параметры и/или алгоритм работы которых могут меняться в процессе эксплуатации в зависимости от внешних сигналов) с функциями метрологического самоконтроля, самодиагностики, самовосстановления и самокалибровки, построенные на основе виртуальных моделей «измерительный преобразователь – объект контроля», технологий искусственного интеллекта и искусственных нейронных сетей.



Основные термины и определения, а также принципы метрологического обеспечения интеллектуальных датчиков и систем рассмотрены на примере действующих российских стандартов ГОСТ Р 8.673 «ГСИ. Интеллектуальные датчики и интеллектуальные измерительные системы. Основные положения» термины и определения» и ГОСТ Р 8.734 «ГСИ. Интеллектуальные датчики и интеллектуальные измерительные системы. Методы метрологического самоконтроля».

Предложена и обоснована структура системы неразрушающего контроля интеллектуальных производств (объектов распределенной инфраструктуры) с элементами сертификации оборудования, методик и цифровых моделей (двойников). Определены основные задачи в области нормативного регулирования интеллектуального НК, МС и др., а также технологий их применения:

1) обеспечение системного подхода к измерениям в области НК как многопараметрическим, учитывающим влияние контролируемых и мешающих параметров, а также параметров модели на результаты измерений;

2) создание организационно-правовой системы и инженерной инфраструктуры для установления полноты и адекватности цифровых моделей (верификации), установления ограничений на их применимость (валидации), а также контроля за правильностью применения цифровых моделей в реальных условиях распределенных инфраструктурных объектов;

3) Создание системы саморегулирования, предусматривающей:

- тестирование цифровых моделей;
- ведение реестра цифровых моделей;
- аттестацию персонала и аккредитацию организаций на право использования цифровых моделей в целях прогнозирования (достижения) предельного состояния или расчета остаточного ресурса и управления реальными объектами и процессами с использованием риск-ориентированного подхода.

Отмечено, что вопросы метрологического обеспечения и стандартизации перспективных НК, МС и т.д. носят междисциплинарный характер, охватывая самые широкие области знаний и техники, начиная от основ физических методов получения измерительной информации, микроэлектроники и программирования, общих вопросов метрологического обеспечения, безопасной передачи, хранения и обработки измерительной информации при обеспечении свободного доступа специалистов в области технической диагностики и других смежных сфер деятельности.

## ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ТЕПЛООВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В ТОМСКОМ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

© 2024 г. **Владимир Платонович Вавилов<sup>1\*</sup>**, **А. О. Чулков<sup>1\*\*</sup>**, **Д. Ю. Кладов<sup>1\*\*\*</sup>**

<sup>1</sup> – *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск,  
пр. Ленина, д. 30*

\* - *vavilov@tpu.ru*; \*\* - *chulkovao@tpu.ru*; \*\*\* - *dyk10@tpu.ru*

Работы Томского политехнического университета (ТПУ) в области теплового контроля (ТК) были начаты в 1970-х годах по инициативе тогдашнего директор НИИ интроскопии В.И. Горбунова, будучи инспирированными рядом зарубежных публикаций и исследованиями Н.А. Бекешко, А.Б. Упадышева, Ю.А. Попова, А.Е. Карпельсона в МНПО «Спектр», г. Москва. На тот же период пришлось развитие отечественного тепловидения, вдохновленное появлением на мировом рынке высококачественных тепловизоров шведской фирмы AGA (затем AGEMA). Томские исследования с самого начала базировались на решении трехмерных задач теплопроводности. Практические применения ТК были связаны с: 1) выявлением воды в теплозащите космического челнока «Буран»; 2) контролем паяных соединений с помощью специализированного теплового дефектоскопа ФИД-1; 3) использованием метода Паркера для двухстороннего ТК углепластика и заготовок мощных тиристоры и др.

Таблица 1

### Специализированное программное обеспечение для ТК

Программа	Описание
Моделирование	
Layer 3 Analytic	Аналитическое решение одномерной трехслойной задачи ТК (нагрев прямоугольным импульсом)
ThermoCalc-2D	Трехслойный диск с дефектом (двухмерная цилиндрическая геометрия)
ThermoCalc-3D Pro и модификации	Базовая программа для решения трехмерной задачи ТК в декартовых координатах в 36-слойной пластине, содержащей до 40 дефектов. Предусмотрены различные виды нагрева во времени и пространстве. Совместимость с программой MatLab.
ThermoSon	Версия ThermoCalc-3D Pro. Стимуляцию твердого тела осуществляют ультразвуком, вызывающем эффект внутреннего трения в дефектах.
Обработка данных	
ThermoFit Pro	Обработка экспериментальных и расчетных последовательностей термограмм с использованием следующих алгоритмов: 1) фильтрация; 2) нормализация; 3) вычитание и усреднение термограмм; 4) полиномиальная аппроксимация; 5) преобразование Фурье; 6) анализ главных компонент; 7) анализ производных; 8) динамическая тепловая томография; 9) корреляционный анализ; 9) вейвлет преобразование; 11) статистический анализ, и др.
ThermoLab	Версия программы ThermoFit Pro, совместимая с MatLab.

Тенденции последних лет в ТК связаны с автоматизацией принятия решения, использованием нейронных сетей и роботизацией. Автоматизацию наиболее легко осуществить в части дефектоскопии, в то время как дефектометрия представляет трудности, в частности, из-

за проблем с эталонами дефектов в ТК. Нейронные сети оказались весьма эффективными при анализе зашумленных данных, но, к сожалению, их применение ограничено однотипными задачами контроля при высокой повторяемости процедуры ТК. В свою очередь, роботизация помогает реализовать потенциально высокую производительность ТК, в особенности, применительно к изделиям сложной формы.

В последние годы существенно расширилась аппаратная база ТК. Ряд новых установок, разработанных в ТПУ, показаны на рис. 1. Дефектоскоп на рис. 1а предназначен для контроля от зоны к зоне и является вариантом устройств известных на мировом рынке (Thermal Wave Imaging, Orgal и др.). Для непрерывного ТК плоских изделий большой площади предназначен самоходный дефектоскоп с непрерывным нагревом и записью термограмм (рис. 1б). Роботизированный комплекс ТК на рис. 1в обеспечивает производительность испытаний до 25 кв. м./час за счет применения полосового нагревателя длиной 1 м. На рис. 1г показан специализированный термоакустический дефектоскоп, предназначенный для обнаружения трещин в керамических покрытиях лопаток турбин.

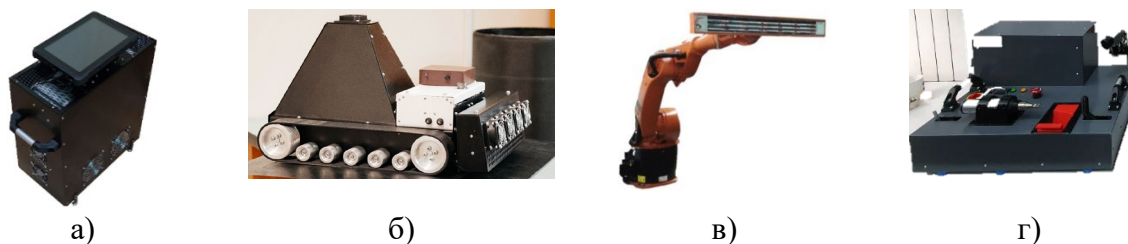


Рис. 1. Аппаратура ТК (ТПУ):

- а – переносной тепловой дефектоскоп с оптическим нагревом;
- б – самоходный тепловой дефектоскоп с полосовым нагревом;
- в – роботизированный комплекс для ТК крупногабаритных изделий;
- г – портативная установка для термоакустического контроля.

Экспериментальные работы последних лет также связаны с комбинированием ультразвукового и ТК, в особенности, термоакустикой [1] и лазерной виброметрией [2].

Вышеописанные исследования были поддержаны грантом FSWW-2023-0004 Министерства науки и высшего образования РФ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Чулков А.О., Нестерук Д.А., Шагдыров Б.И., Вавилов В.П. Метод и аппаратура инфракрасного и ультразвукового термографического контроля крупногабаритных композиционных изделий сложной формы // Дефектоскопия. 2021. № 7. С. 67—74.
2. Шпильной В.Ю., Вавилов В.П., Дерусова Д.А., Дружинин Н.В., Ямановская А.Ю. Особенности проведения неразрушающего контроля полимерных композиционных материалов с использованием бесконтактной ультразвуковой стимуляции и лазерного вибросканирования // Дефектоскопия. 2021. № 8. С. 14—23.

## УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕФЕКТОМЕТРИЯ: ОТ СПЕКТРАЛЬНОГО ОБРАЗА ДО КОГЕРЕНТНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОРТРЕТА ДЕФЕКТОВ

© 2024 г. Алексей Харитонович Вопилкин<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> – ООО «НПЦ «ЭХО+», 123458 Москва, ул. Твардовского, д. 8

\* - [vopilkin@echoplus.ru](mailto:vopilkin@echoplus.ru)

В докладе приведена история развития одного из актуальных направлений ультразвукового контроля – ультразвуковой дефектометрии – за 50-летний период работ автора сначала в НПО ЦНИИТМАШ, затем в НПЦ «ЭХО+». Начинались работы с применения дифракционных методов оценки типа и размеров дефектов. Затем на смену им пришли ультразвуковые голографические методы, которые сослужили хорошую службу на атомных электростанциях. В последние годы активно развиваются методы и аппаратура ультразвуковой дефектометрии с использованием фазированных решеток (ФР). Апострофом создания приборов ФР явился выпущенный на рынок ФР дефектоскоп на 128 каналов, в котором реализованы одновременно три технологии контроля.

### *Ультразвуковая дефектометрия на основе спектрального и дифракционного образов*

Ультразвуковой спектральный метод основан на различной реакции отраженного сигнала при падении на дефект различной формы. Для плоскостного дефекта спектр носит периодический осциллирующий характер, а для объемного дефекта спектр носит равномерный характер без осцилляций. Этот метод реализован в ультразвуковом спектрографе, внедренном на ряде предприятий.

Прибор был достаточно громоздким и не удобным в цеховых условиях. В то же время было понятно, что разбиение дефектов на два класса (плоскостные и объёмные) недостаточно, поскольку большинство дефектов находятся в промежутке между двумя полярными классами. Это с одной стороны, а с другой стороны специалисты по прочности моделируют при расчетах дефекты в виде эллипсов с соотношением полуосей эллипсов от 0,5 для сферы до 0,001 для трещины (соотношение получило название коэффициента формы  $Q$ ). Такая шкала эллипсов перекрывает все возможные размеры дефектов. В связи с этим, на Ижорском заводе была заказана серия образцов с моделями эллиптических дефектов, перекрывающих всю шкалу эллипсов. Перед началом исследований была предложена классификация типов дифракции, состоящая из 4-х типов:

- Дифракция на острых краях трещины; отраженное поле формируется как суперпозиция двух сигналов от кончиков трещины, причем фазы обоих сигналов отличаются на 180 градусов;
- Дифракция на гладкой выпуклой поверхности; здесь формируется волна обегания-соскальзывания, но осцилляции отсутствуют;

- Дифракция на границе раздела двух сред; этот тип дифракции характерен для излучения волны вблизи первого критического угла. В этом случае образуется головная волна, распространяющаяся вдоль поверхности и переизлучающая боковую волну. Головная волна широко используется для контроля подповерхностных дефектов. Она не чувствительна к неровности поверхности;

- Дифракция в слоисто-неоднородных средах. Этот тип дифракции наблюдается в поверхностно закаленных слоях валков холодной прокатки, в аустенитных сварных швах, в которых вследствие неравномерной кристаллизации, по его сечению изменяется скорость распространения волн.

Наибольшее практическое применение нашли первый и третий тип дифракции. Волна, излученная в металл под первым критическим углом (для пары плексиглас – сталь этот угол составляет 27,5 град), вдоль свободной поверхности металла распространяется, как головная волна, которая является неоднородной, самостоятельно существовать не может и в каждой точке своего распространения переизлучает боковую поперечную волну, которая, дойдя до нижней свободной поверхности, переизлучает вторичную головную волну. Головная волна имеет ряд позитивных особенностей. В частности, она не чувствительна к неровностям поверхности и может быть применена для выявления подповерхностных дефектов.

### ***Ультразвуковая дефектометрия на основе когерентных голографических изображений дефектов***

Когерентные методы с обработкой во временной области общепринято называть SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique). В наших ранних работах мы показали, что в рамках дифракционной теории алгоритм SAFT можно реализовать как во временной области, так и в области пространственных частот. В начале 90-х годов персональная компьютерная техника была еще очень примитивная и не позволяла реализовать временной алгоритм, поэтому выбор был сделан на частотный алгоритм. Этот алгоритм называется проекция в спектральном пространстве (ПСП) и метод назван акустической голографией.

Упрощенно технология акустической голографии состоит в следующем. В изделие излучают короткие ультразвуковые импульсы с широкой диаграммой направленности (30-60 град.), сканируют ПЭПом с малым шагом (0,1..0,5 мм) по поверхности изделия строго по прямым линиям, в каждой точке сканирования принимают отраженные от дефекта сигналы и оцифровывают их. Обработывают полученную последовательность сигналов с помощью алгоритма ПСП, визуализируют полученные сигналы в виде проекции изображения на три плоскости (B, C и D).

Физически это означает, что путем измерения фазовых сдвигов между излученным и принятым сигналами во всем пространстве контролируемого изделия на приеме формируется

узкий, слабо расходящийся пучок, шириной порядка 1 мм. Тем самым удастся визуализировать отдельные сечения, сложив которые, можно получить изображение дефекта. При этом разрешающая способность может повышаться в десятки раз.

Предложенная новая технология диагностики объектов повышенной опасности, заключающаяся в трехуровневом контроле с измерением реальных размеров дефектов, позволила проводить оценку состояния эксплуатируемых объектов по их фактическому состоянию и выйти на управление остаточным ресурсом.

Уже в первые годы применения голографического контроля удалось снизить более чем в два раза объем ремонта благодаря тому, что появилась возможность разделять выявляемые дефекты на опасные и неопасные, которые не влияют на работу объекта. А неопасных дефектов было большинство. Как правило, они образовывались еще на стадии изготовления оборудования и в течение всего срока эксплуатации не развивались.

## ВОПРОСЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ТОНКИХ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ НА ПРИМЕРЕ ЛИСТОВ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА

© 2024 г. Ольга Владимировна Муравьева<sup>1\*</sup>, А. В. Блинова<sup>1</sup>, Л. А. Денисов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – *Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, 426000 Ижевск, ул. Студенческая, д. 7*

\* - *pmkk@istu.ru*

Пористые материалы имеют широкий спектр применения благодаря ряду оптимальных физических и механических характеристик. Одним из представителей пористых материалов является терморасширенный графит (ТРГ), уникальные свойства которого (малый вес, высокие механические свойства, регулируемая теплопроводность, высокая электропроводность, эрозионная стойкость) обеспечили его широкое применение в различных областях промышленности. Сложность обеспечения равномерности распределения физических свойств в листовых пористых материалах обуславливает необходимость разработки методов контроля таких сред.

В работе представлены подходы и результаты исследований процессов распространения акустических волн в тонких листах ТРГ. Исследования проведены с использованием следующих методов и оборудования:

- бесконтактный амплитудно-теневой метод контроля используется для определения коэффициента прозрачности акустической волны, прошедшей сквозь объект и реализован с использованием специализированных низкочастотных преобразователей, согласованных с воздухом;
- временно-теневой метод используется для определения скоростей упругих волн: продольных волн по толщине листа (реализован с использованием гибкого пьезопреобразователя на основе ПВДФ); симметричной моды волны Лэмба и SH-волны (реализован с использованием пьезопреобразователей с сухим точечным контактом).

Теоретические исследования проведены с использованием теории волн в слоистых средах Бреховских Л.М.

Получены следующие результаты:

- проведена верификация разработанного акустического метода для определения изменения плотности листа, подтвержденного прямым весовым методом;
- оценена чувствительность метода акустического метода к локальному изменению плотности и массы листа ТРГ;
- исследована неравномерность распределения плотности по площади листов ТРГ;
- оценена чувствительность метода к сквозным дефектам листа;

- выявлена экспериментально и подтверждена теоретически зависимость коэффициента прозрачности от поверхностной плотности листов ТРГ;
- определены скорости продольной волны, симметричной моды волны Лэмба и SH-волны в различных направлениях и оценена акустическая анизотропия свойств.

Разработанные акустические методики обеспечивают достаточно высокую точность и достоверность и могут эффективно применяться для контроля других стратегически важных пористых листовых материалов и конструкций.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-29-10167 с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).*



## ОЦЕНКА НЕОДНОРОДНОСТИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЦИЛИНДРАХ ГЛУБИННО-ШТАНГОВОГО НАСОСА

© 2024 г. Виталий Васильевич Муравьев<sup>1\*</sup>, А. С. Хомутов<sup>1</sup>, К. А. Торхов<sup>1</sup>,  
Е. А. Степанова<sup>1</sup>, В. Д. Попова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», 426069 Ижевск,  
ул. Студенческая, д. 7

\* - [vmuraviev@mail.ru](mailto:vmuraviev@mail.ru)

Глубинно-штанговые насосы (ГШН) широко применяются в нефтяной промышленности для механизированной добычи нефти. В процессе производства цилиндр глубинно-штангового насоса подвергается различным циклам механико-термической обработки, которые могут привести к образованию остаточных напряжений в стенках цилиндра, что повлияет на изменение геометрии, формы и появление дефектов [1].

Цель работы: оценка неоднородности остаточных напряжений в цилиндрах ГШН по длине и по окружности трубы на основе явления акустоупругости.

Для оценки остаточных напряжений, коэффициента Пуассона и толщины цилиндров стенки ГШН использованы бесконтактный электромагнитно-акустический преобразователь и структуроскоп электромагнитно-акустический (СЭМА), а также локальный преобразователь из гибкой поливинилденфторидной пленки и дефектоскоп DIO-1000 PA [2].

Исследования проводились на образцах цилиндров с размерами внешнего и внутреннего диаметров и длиной 57,64×43,65×4450 мм, изготовленных из стали нитраллой 38CrMoAl, после четырех стадий технологического процесса изготовления: поставка, операция отпуска, процесс шлифовки и ионное азотирование. В процессе измерений преобразователь устанавливался на расстоянии 50, 210 и 370 см от торца цилиндра. В каждом сечении преобразователь перемещался по окружности цилиндра на угол  $\alpha$  от 0° до 360° с шагом в 90°. Полученные эхограммы обработаны в ПО «Принц» и ПО Mathcad.

В результате экспериментальных исследований наблюдаются отклонения остаточных напряжений, коэффициента Пуассона на всех стадиях технологического процесса (рис. 1, 2). Выявлены зависимости между отклонениями напряжений и толщиной стенки цилиндра ГШН, связанные с технологическими процессами обработки изделия (рис. 3).

Максимальные отклонения остаточных напряжений получены после операции шлифовки, минимальные отклонения – после операции отпуска. Коэффициент Пуассона равномерен по окружности после операции отпуска и неравномерен после шлифовки. Максимальное значение коэффициента наблюдается после операции шлифовки – 0,296, минимальное значение после азотирования – 0,286. Связь остаточных напряжений и толщины стенки цилиндра наблюдается на всех стадиях технологического процесса.

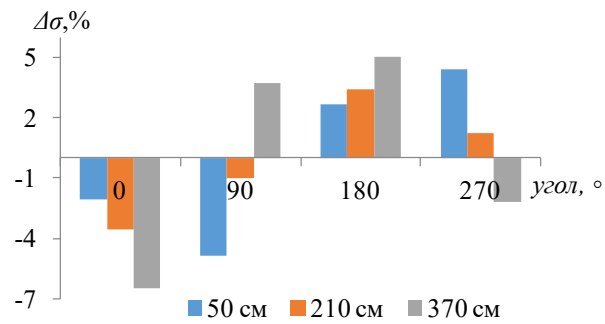


Рис. 1. Отклонения остаточных напряжений по периметру и по длине труб (поставка).

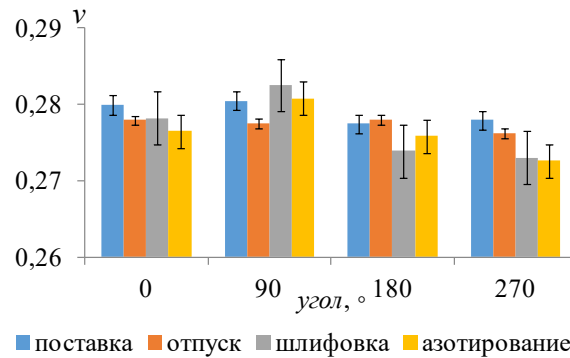


Рис. 2. Изменения коэффициента Пуассона по периметру труб.

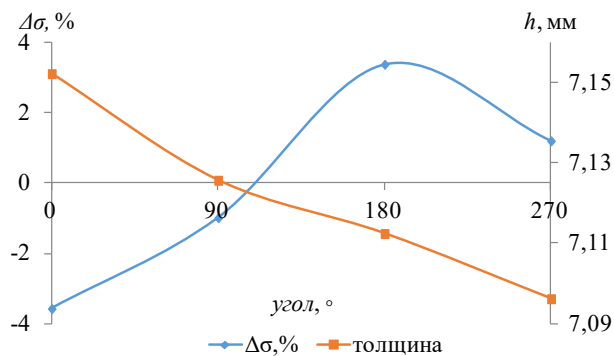


Рис. 3. Изменения напряжений и толщины стенки цилиндра по периметру (поставка).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хомутов А.С., Муравьев В.В. Выявление дефектов цилиндра глубинно-штангового насоса после ионного азотирования // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 2. С. 16—26. DOI 10.22213/2410-9304-2023-2-16-26.
2. Булдакова И.В., Волкова Л.В., Муравьев В.В. Распределение напряжений в образцах труб магистральных газопроводов со сварным соединением // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18, № 1. С. 4—8. DOI 10.22213/2410-9304-2020-1-4-8.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ГОЛОВКИ РЕЛЬСОВ В ПУТИ

© 2024 г. Алексей Леонидович Бобров<sup>1\*</sup>, К. И. Гончаров<sup>1\*\*</sup>, С. П. Шляхтенков<sup>1\*\*\*</sup>,  
И. К. Тыштыкова<sup>1\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049  
Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 191

\* - [acndt@mail.ru](mailto:acndt@mail.ru); \*\* - [kirya.pochta@gmail.com](mailto:kirya.pochta@gmail.com); \*\*\* - [shlyakhtenkow@gmail.com](mailto:shlyakhtenkow@gmail.com);  
\*\*\*\* - [fmklab@mail.ru](mailto:fmklab@mail.ru)

Неразрушающий контроль рельсов является одним из основных условий безопасности железнодорожного транспорта, и выявление дефектов на ранней стадии их развития – это залог обеспечения этой безопасности. Определяющим фактором, влияющим на образование выкрашиваний в головке и долговечность работы рельсов, является скорость развития микротрещин в контактной части рельсов в кривых [1]. Своевременное выявление такого рода дефектов позволяет контролировать качество рельсов и процесс их шлифования и обеспечить технологическую надежность пути.

Решение проблемы обнаружения и оценки глубины контактно-усталостных трещин в поверхностном контактном слое головки рельсов является актуальной проблемой, которая стоит перед предприятиями железнодорожной инфраструктуры. Исследования в этом направлении проводятся с применением вихретокового метода [2], а для контроля поверхностных трещин при производстве рельсов применяются поверхностные ультразвуковые волны [3].

Учитывая достаточно высокую чувствительность волн Рэлея к поверхностным дефектам [4], в данной работе экспериментально исследованы возможности контроля поверхностными волнами контактно-усталостных трещин.

Предварительные металлографические исследования показали, что контактно-усталостные трещины образуются в кривых под воздействием комплекса нагрузок, что отмечено также в работе [1], и проникают на глубину закаленного и наклепанного слоя на глубину до 1 мм и шириной раскрытия до 0,1 мм. Кроме того эти трещины имеют наклон около  $35 \pm 5^\circ$  к поверхности рельса (рис. 1).

Исследования проводили с помощью преобразователей поверхностных волн, работающих на разных частотах – 1,25, 1,8, 2,5 и 4 МГц с помощью ультразвукового дефектоскопа УДЗ-204. Измеряли относительную амплитуду сигнала от отражателей эхо-импульсным методом, отнесенную к амплитуде опорного сигнала, отраженного от прямого угла в стандартном образце на заданном расстоянии. Как показали измерения, амплитуда поверхностных волн в зависимости от увеличения расстояния убывает слабо и в пределах 100 мм изменяется на 5-7 дБ для волн на всех исследованных частотах, но на частоте затухание волн возрастает примерно в два раза.

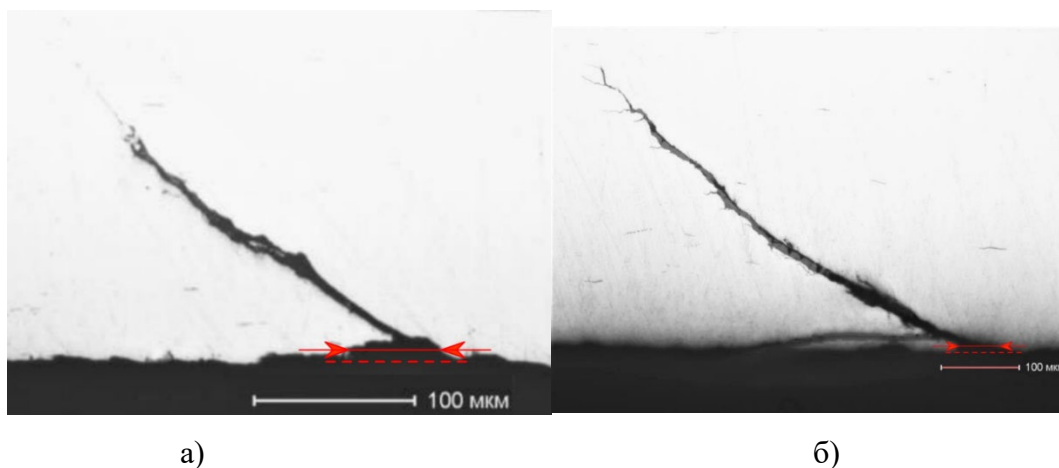


Рис. 1. Контактно-усталостные трещины в головке рельса глубиной 0,13 мм (а) и 0,4 мм.

Результаты исследований показывают, что контактнo-усталостные трещины глубиной менее 0,5 мм не обнаруживаются ультразвуковым методом, более крупные трещины отражают сигналы, которые значительно меньше аналогичных сигналов от искусственных дефектов на 6–10 дБ. Наиболее высокая чувствительность к такого рода трещинам у волн на частоте 2,5 МГц. Важным достоинством ультразвукового метода контроля поверхностных трещин является частичное огибание волнами поверхностных трещин и возможность наблюдать и регистрировать несколько дефектов, находящихся на пути волн Рэлея.

Учитывая то обстоятельство, что к мелким неоднородностям чувствителен вихретоковый метод контроля [2], комбинирование этих методов помогает определять глубину распространения контактнo-усталостных трещин, что существенно влияет на коррекцию мероприятий по восстановлению профиля рельсов шлифованием.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецова Н.В. Статистический анализ изъятий рельсов с контактнo-усталостными видами дефектов // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2021. Т. 17. № 17. С. 41—47.
2. Шляхтенков С.П., Некрасов Д.Б., Палагин С.В., Бессонова О.В., Попков А.А., Бехер С.А. Возможности ручного вихретокового контроля для измерения глубины контактнo-усталостных трещин поверхности катания рельсов // Дефектоскопия. 2023. № 4. С. 37—45.
3. Дымкин Г.Я., Кириков А.В., Бондарчук К.А. Иммерсионный контроль объектов криволинейного профиля поверхностными ультразвуковыми волнами // Дефектоскопия. 2022. № 8. С. 25—35.
4. Алешин Н.П., Крысько Н.В., Скрынников С.В., Кусый А.Г. Исследование выявляемости поверхностных плоскостных дефектов ультразвуковым методом с применением волн Рэлея // Дефектоскопия. 2021. № 6. С. 26—34.

## АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ УГЛЕПЛАСТИКА НАКЛАДНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

© 2024 г. Алексей Леонидович Бобров<sup>1\*</sup>, Е. А. Куклина<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup> – ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049

Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 191

\* - [acndt@mail.ru](mailto:acndt@mail.ru); \*\* - [e.kyklina@mail.ru](mailto:e.kyklina@mail.ru)

Широкое распространение композиционных материалов предопределяет развитие методов и средств контроля их качества. Учитывая, что часть композиционных материалов изготавливают на основе углеродных волокон, которые являются проводниками, в последние годы активно используется вихретоковый вид неразрушающего контроля [1-3], в том числе для поиска дефектов.

Традиционно к дефектам углепластиков относят и несплошности макроскопического масштаба, и микродефекты, вплоть до нарушений кристаллического строения [4]. Поэтому для наиболее качественного выявления несплошностей и неоднородностей в углепластиках крайне необходимо определить максимальную чувствительность к разным типам и размерам разных дефектных структур.

В данной работе проведены исследования чувствительности абсолютных трансформаторных накладных вихретоковых преобразователей к макронеплошностям в углепластиках типа АСМ102, так как нарушения сплошности волоконной основы углепластиков приводят к снижению их прочностных свойств.

Для исследований в углепластиковых панелях толщиной 3 мм были сделаны искусственные дефекты: три пропила шириной 0,2 мм и глубиной 0,5, 1,5 и 2,5 мм. Протяженность пропилов 10...15 мм. Также был симитирован локальный дефект нарушения сетки углеродного волокна путем сквозной засверловки диаметром 2 мм.

Учитывая относительно невысокую электрическую проводимость матрицы углеродного волокна, для повышения чувствительности необходима относительно высокая частота генерируемых возбуждающей обмоткой. Анализ годографа вносимого напряжения на измерительной обмотке показал, что наибольшую чувствительность к дефектам всех приведенных типов наблюдали на частоте 300...350 кГц.

Измерения вносимого напряжения показали, что чувствительность к плоским дефектам глубиной 1,5 и 2,5 мм, а также цилиндрическому локальному дефекту примерно одинаковая, а к дефекту глубиной 0,5 мм – в три раза меньше. Это можно объяснить тем, что для более глубоких дефектов углеродное волокно повреждено насквозь, а в случае нарушения сплошности глубиной 0,5 мм нарушены связи только части углеродных волокон. Характерно, что основные мешающие факторы, такие как зазор, приближение к краю изделия приводят к отклонению вносимого

напряжения в направлении, перпендикулярном направлению отклонения, связанному с нарушением сплошности материала. При этом увеличение чувствительности выше 320...350 кГц практически не приводит к изменению значения угла направления изменения вносимого напряжения между приведенными мешающими параметрами и измеряемым сигналом от несплошностей. Вместе с тем влияние отклонения преобразователя от нормали к поверхности неоднозначно и, видимо, зависит от распределения и направления углеродных волокон в матрице относительно наклона преобразователя. Уменьшить это влияние можно многократным сканированием участка или использованием стабилизирующих датчик фиксаторов в нормальном положении.

Дополнительную сложность в контроль вносят такие факторы, как направление плетения углеродной матрицы, что приводит к нестабильности сигнала и требует динамического режима отстройки от помех. Такое влияние было подтверждено при дополнительных исследованиях непосредственно на углеродном волокне, без эпоксидного связующего.

Еще одной особенностью контроля углепластика стала относительно большое отклонение сигнала при изменении геометрии проводящего материала на контролируемой панели, к которым можно отнести край изделия, угловые участки, места таврового сопряжения. Так, краевой эффект возникает на расстоянии более 5 диаметров обмотки преобразователя, и на всех частотах это расстояние примерно одинаково.

Проведение контроля с полученными характеристиками показало в трех проконтролированных панелях наличие только точечных отклонений вносимого напряжения, аналогичное тому, которое происходит при пересечении искусственных дефектов. Малые отклонения траектории не позволяют идентифицировать дефект, что требует малого шага сканирования – менее 2 мм.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Саяхов И.Ф.* Диагностика композитных материалов в электрических машинах // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 2 (43). С. 65—69.
2. *Мухеев П.В., Бухаров С.В., Лебедев А.К., Сундер Р.* Неразрушающий контроль полимерных композиционных материалов методом вихретоковой дефектоскопии в процессе циклического нагружения // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2023. № 11 (143).
3. *Jun Ch., Xiaojuan X., Hongli J., Jinhao Q.* Research advances in eddy current testing for maintenance of carbon fiber reinforced plastic composites // *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2016. V. 51(3). P. 261—284.
4. *Карташова Е.Д., Муйземнек А.Ю.* Технологические дефекты полимерных слоистых композиционных материалов // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2017. № 2 (42). С. 79—89.

## ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ СРЕДСТВАМИ ТЕНЗОМЕТРИИ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ТЕПЛОМ НАГРУЖЕНИИ

© 2024 г. Сергей Алексеевич Бехер<sup>1\*</sup>, А. А. Попков<sup>1\*\*</sup>, В. В. Выплавень<sup>1\*\*\*</sup>,  
М. А. Гуляев<sup>1</sup>, С. П. Шляхтенков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – *Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049 Новосибирск,  
ул. Дуси Ковальчук, д. 191*

\* - *behers@mail.ru*; \*\* - *zabagy@mail.ru*; \*\*\* - *vladimir97927@gmail.com*

Неподвижность прессовых и болтовых соединений обеспечивают силы трения, которые зависят и от уровня упругих механических напряжений, и коэффициента трения. Наиболее характерными и широко распространенными ответственными соединениями с упругими напряжениями являются: прессовые соединения колец подшипников и колес с шейками осей и валами, бандажей с колесными центрами, болтовых соединений строительных конструкций, машин и механизмов. Изменение состояния контактирующих поверхностей, износы и деформация элементов в эксплуатации приводят к снижению сил трения, подвижности соединений и, как следствие, авариям и крушениям.

В настоящее время единственным достоверным способом контроля деталей является демонтаж, измерение размеров и повторный монтаж с измерением максимального усилия [1]. Недостаток данного способа связан со значительными временными и материальными затратами, высокой вероятностью повреждения элементов соединений. Поэтому проблема создания методики и оборудования для неразрушающего контроля неподвижных разъемных соединений является актуальной. Сложность задачи связана с комплексным характером прочности соединения, на которую оказывают влияние малые изменения размеров и деформации, общее состояние и локальные дефекты сопряженных поверхностей [2].

Целью работы является создание способа контроля прочности соединений с натягом на основе локального теплового воздействия и тензометрии на основе временных закономерностей распределения тепловых деформаций в прессовых соединениях с различным натягом.

Предварительно нагретый до 200 °С латунный усеченный цилиндр с запасом тепловой энергии относительно температуры окружающей среды 81 кДж размещали на поверхности свободных колец и колец, напрессованных на валы с натягами 38, 65, 67, 105, 118 мкм. Поверхностное распределение температуры контролировали тепловизором Testo 875-1i, зависимость температуры от времени в месте установки тензодатчика регистрировали контактным термометром с частотой 1 Гц и разрешением 0,06 °С. Деформации измерялись оптико-поляризационным датчиком деформаций с частотой дискретизации 50 Гц на кольца и на валу на расстоянии более 60 мм от места нагрева. Датчик с базой 60 мм с ценой наименьшего

разряда аналого-цифрового преобразователя составляет 0,013 мкм с абсолютной погрешностью не более  $4 \cdot 10^{-7}$ .

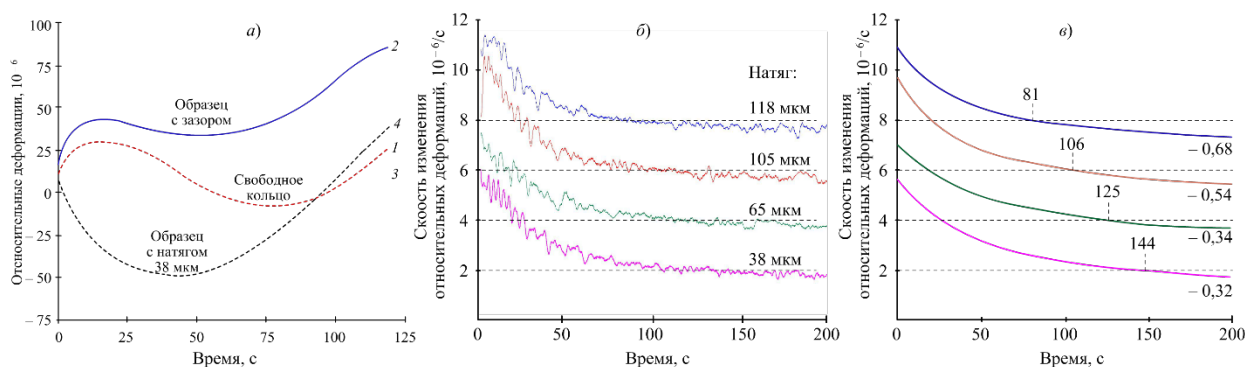


Рис. 1. Временные зависимости деформаций кольца при нагреве (а) и временные зависимости скорости изменения деформаций образцов с известными натягами, усредненные на интервале 2 с (б) и 50 с (в).

Экспериментально-расчетным способом показана возможность пространственного разделения зон теплового воздействия и измерения деформаций за счет достаточно медленной скорости распространения теплового потока не более 1,5 мм/с. Наличие зазора в прессовом соединении однозначно идентифицируется по знаку деформаций кольца подшипника (рис. 1 а). Временная зависимость скорости деформаций в окне длительностью 2 с (рис. 1 б) содержит нестационарные пульсации, которые отражают дискретный характер локального «проскальзывания» кольца и вала, когда напряжение на границе превышает силы трения. Время достижения максимума деформаций, определяемое по изменению знака скорости в окне 50 с (рис. 1 в), коррелируют с натягами прессовых соединений с коэффициентом корреляции 0,97 и коэффициентом пропорциональности – 0,71 мкм/с.

Экспериментально показано, что необходимым условием организации контроля прессовых соединений является создание в объекте необходимого градиента температуры и соответствующего ему уровня нормальных и касательных деформаций на границе соединения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10110, <https://rscf.ru/project/23-29-10110/> и финансовой поддержки Правительства Новосибирской области.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Матлин М.М., Казанкин В. А., Казанкина Е.Н. Методы повышения эффективности контроля затяжки резьбовых соединений (обзор публикаций) // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2020. № 7. С. 40—42.
2. Boutoutaou H., Bouaziz M., Fontaine J.F. Modeling of interference fits taking form defects of the surfaces in contact into account // Materials & Design. 2011. V. 32, Iss. 7. P. 3692—3701.



## ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ ПО МАГНИТНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

© 2024 г. Алексей Николаевич Сташков<sup>1\*</sup>, Е. А. Щапова<sup>1</sup>, А. П. Ничипурук<sup>1</sup>,  
Н. В. Гордеев<sup>1,2</sup>, А. М. Матосян<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> – *Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, 620108 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, д. 18*

<sup>2</sup> – *Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, 620002 Екатеринбург, ул. Мира, д. 19*

\* - *stashkov@imp.uran.ru*

Представлены результаты исследований магнитных свойств технически чистого железа, углеродистых сталей и никеля, подвергнутых упругим и пластическим деформациям. Измерялись полевые зависимости дифференциальной и обратимой магнитной проницаемости как на отожженных недеформированных образцах, так и на упруго и пластически деформированных образцах. Установлено, что появление дополнительных максимумов на кривых связано с возникновением магнитной текстуры типа «легкая плоскость» в образцах из-за остаточных или приложенных напряжений (рис. 1а). Одним из основных условий возникновения такой магнитной текстуры являются разные по знаку магнитострикция и напряжения ( $\lambda \cdot \sigma < 0$ ). Появление дополнительных максимумов на кривых связано со смещением преимущественно 90-градусных доменных границ, наиболее чувствительных к механическим напряжениям. Из экспериментально измеренных кривых были определены значения полей максимумов  $H_1$  и  $H_2$  (рис. 1б), а также рассчитаны значения механических напряжений сжатия в стальных образцах и растяжения в никеле:

$$\sigma_{xx} = -\alpha \frac{2\mu_0 H_{avg} M_S}{3\lambda_{100}}, \quad (1)$$

где  $M_S$  – намагниченность насыщения,  $\lambda_{100}$  – константа магнитострикции в направлении (100);  $\sigma_{xx}$  – компонента тензора механических напряжений,  $\alpha$  – коэффициент, связанный с типом кристаллической решетки ферромагнетика (0,82 для железа и феррито-перлитных сталей);  $H_{avg}$  – среднеарифметическое полей  $H_1$  и  $H_2$ .

Данный подход является новым и позволяет применить его для неразрушающего контроля механических напряжений в конструкциях и деталях из ферромагнитных материалах. Более подробно результаты работы приведены в [1-5].

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», №122021000030-1).

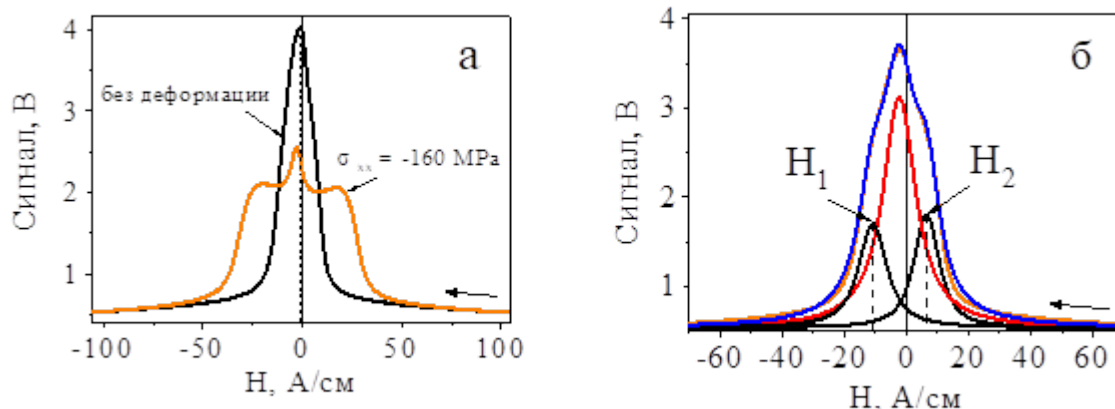


Рис. 1. Полевые зависимости сигнала индукционного преобразователя, пропорциональные обратной магнитной проницаемости, для технически чистого железа (а) и пример обработки экспериментальной кривой для нахождения полей  $H_1$  и  $H_2$  (б).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Nichipuruk A.P., Rozenfel'd E.V., Ogneva M.S., Stashkov A.N., Korolev A.V. An experimental method for evaluating the critical fields of moving domain boundaries in plastically tension-deformed low-carbon wires // Russ. J. Nondestruct. Test. 2014. V. 10. P. 18–26. DOI: 10.1134/S1061830914100088.
2. Stashkov A.N., Schapova E.A., Nichipuruk A.P., Korolev A.V. Magnetic incremental permeability as indicator of compression stress in low-carbon steel // NDT & E International. 2021. V. 118. P. 102398–102402. DOI: 10.1016/j.ndteint.2020.102398.
3. Stashkov A.N., Schapova E.A., Afanasiev S.V., Stashkova L.A., Nichipuruk A.P. Estimation of residual stresses in plastically deformed eutectoid steel with different perlite morphology via magnetic parameters // J. Magn. Magn. Mater. 2022. V. 546. P. 168850–168856. DOI: 10.1016/j.jmmm.2021.168850.
4. Stashkov A.N., Schapova E.A., Nichipuruk A.P., Stolbovsky A.V. Magnetic Incremental Permeability of Elastically Deformed Iron and Nickel // Journal of nondestructive evaluation. 2024. V. 43. P. 8–15. DOI:10.1007/s10921-023-01023-y.
5. Nichipuruk A.P., Stashkov A.N., Kuleev V.G., Schapova E.A., Osipov A.A. A Procedure and Device for Calibration-Free Determination of Residual Compression Stresses in Low-Carbon Steels Deformed by Tension. // Russ. J. Nondestruct. Test. 2017. V. 11. P. 772–778. DOI:10.1134/S1061830917110055.

## СОЧЕТАНИЕ ДАННЫХ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

© 2024 г. Николай Владимирович Крысько<sup>1,2\*</sup>, С. В. Скрынников<sup>3\*\*</sup>,  
А. Г. Кусый<sup>1,2\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – МГТУ имени Н. Э. Баумана, 105005 Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

<sup>2</sup> – ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана», 105005 Москва,  
ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

<sup>3</sup> – ПАО «Газпром», 117997 Москва, ул. Наметкина, д. 16, ГСП-7

\* - kryskonv@bmstu.ru; \*\* - S.Skrynnikov@adm.gazprom.ru; \*\*\*- andrei.k.166@mail.ru

**Цель работы.** Определить информационные параметры, получаемые из данных неразрушающего контроля (НК) сварных швов и основного металла магистральных трубопроводов. Определить неоднозначность классификации и оценки параметров дефектов сварных швов и основного металла магистральных трубопроводов. Определить степень влияния информационных параметров методов НК на классификацию и оценку параметров дефектов сварных швов и основного металла магистральных трубопроводов. Разработать модели совместного анализа данных НК сварных швов и основного металла магистральных трубопроводов и оценить их работоспособность.

**Суть обсуждаемой проблемы.** Сегодня во всем мире существует и продолжает сооружаться большое количество магистральных трубопроводов. При сооружении магистральных трубопроводов производится большое количество стыковых кольцевых сварных соединений, выполненных дуговой сваркой. Данные сварные соединения склонны к наличию таких дефектов как трещины, несплавления с кромкой, поры, неметаллические включения, подрезы, непровары в корне шва, дефекты геометрии шва и т.п., классификация которых регламентирована в [1]. При эксплуатации трубопроводов основную часть дефектов составляют поверхностные коррозионные повреждения основного металла, возникающие под воздействием внешней среды [2]. Такие дефекты можно разделить на плоскостные, например, стресс-коррозионные трещины, и объемные – местная коррозия (питинги, свищи т.д.) [3]. Для обеспечения длительной безопасной эксплуатации магистральных трубопроводов в настоящее время актуально развитие технологий диагностирования с применением комплекса методов неразрушающего контроля, таких как визуальный и измерительный, вихретоковый, радиографический и ультразвуковой, позволяющих производить классификацию данных дефектов и определять их параметры в автоматическом режиме. Данные, собранные разными системами неразрушающего контроля, могут быть противоречивыми, неполными или неоднозначными, если анализировать результаты различных методов неразрушающего контроля по отдельности. Цифровые технологии сочетания данных используются для объединения

информации, полученной несколькими методами неразрушающего контроля, и применяются для принятия решений о состоянии объекта контроля, что позволяет существенно уменьшить вероятность ошибочной интерпретации данных контроля, связанных с человеческим фактором. Для задач оценки качества магистральных трубопроводов необходимо создать модели сочетания данных на основе таких подходов как статистические алгоритмы, теория нечетких множеств и машинное обучение, которые позволят на основе совместного рассмотрения данных различных методов НК оценивать тип и параметры выявленных дефектов.

**Полученные результаты.** Определены информационные параметры, получаемые из данных неразрушающего контроля (НК) сварных швов и основного металла магистральных трубопроводов. Определена неоднозначность классификации и оценки параметров дефектов сварных швов и основного металла магистральных трубопроводов. Определена степень влияния информационных параметров методов НК на классификацию и оценку параметров дефектов сварных швов и основного металла магистральных трубопроводов. Разработаны модели совместного анализа данных НК сварных швов и основного металла магистральных трубопроводов и оценена их работоспособность.

**Выводы.** На основе сформированного набора данных, содержащих дефекты сварных швов и основного металла, определен вектор входных информационных параметров различных методов НК, состоящих из 6 параметров для контроля основного металла и 23 параметров для контроля сварных швов. Данные параметры не имеют зависимости между собой, а также в равнозначной степени вносят информацию для классификации и определения параметров дефектов. Построены модели сочетания данных методов НК при контроле основного металла и сварных швов магистральных трубопроводов, оптимальной моделью согласно выбранным метрикам является модель на основе «градиентного бустинга» [4].

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р ИСО 6520-1-2012. Сварка и родственные процессы. Классификация дефектов геометрии и сплошности в металлических материалах. Часть 1. Сварка плавлением.
2. Давыдова Д.Г. Дефекты технологических трубопроводов: типология, оценка влияния на эксплуатацию // Промбезопасность-Приуралье. 2012. № 8. С. 24—28.
4. Бутусов Д.С., Егоров С.И., Завьялов А.П., Ляпичев Д.М. Коррозионное растрескивание под напряжением газопроводов: Учебное пособие. М.: Издательский центр РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2015. 80 с.
5. Zhiyuan He, Danchen Lin, Thomas Lau, Mike Wu. Gradient Boosting Machine: A Survey. 2019 // arXiv:1908.06951.

## НЕРАЗРУШАЮЩИЙ СПОСОБ КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕПЛООБМЕНА И ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

© 2024 г. Елена Владимировна Гарнышова<sup>1\*</sup>, Е. В. Измайлова<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup> – *Казанский государственный энергетический университет, 420066 Казань,  
ул. Красносельская, д. 51*

\* - *garnyshova@mail.ru*; \*\* - *evgeniya-izmailova@yandex.ru*

Для трубопроводных систем характерна проблема, связанная с интенсивным накипеобразованием на их поверхностях, зарастанием и «заклиниванием» систем различными отложениями, присутствующими в сетевой воде, и продуктами коррозии. Образование отложений может блокировать работу, ускорить коррозию и привести к перегревам, прогарам и разрывам труб. Один из методов решения задачи повышения энергоэффективности, а также продления срока эксплуатации, заключается в уменьшении отрицательного влияния отложений. Наличие отложений ухудшает условия теплообмена и увеличивают гидравлическое сопротивление системы, вызывает опасное повышение температуры металла, поэтому целью работы является разработка способа контроля и обнаружения наличия отложений на поверхностях теплообмена. Для этого предлагается использовать неразрушающий метод контроля, в частности метод свободных колебаний.

Технический результат достигается тем, что в способе контроля и обнаружения дефектов поверхностей теплообмена и трубопроводных систем осуществляют возбуждение свободных колебаний, регистрацию параметров колебаний, посредством пьезоэлектрического датчика, и дальнейшую запись, и анализ параметров этих колебаний в персональном компьютере.

Изменение спектра колебаний протяженного объекта от мелкого дефекта незначительно, поэтому их обнаружение затруднительно, и для повышения точности результатов контроля необходимо заставить колебаться только интересующий нас участок конструкции. Этого можно добиться с помощью демпфирующей рамки, прижимаемой к исследуемой поверхности.

В экспериментальных исследованиях на поверхность теплообмена устанавливали демпфирующую рамку и источник колебаний, представляющий собой аппаратно-программный комплекс [1]. Он состоит из ударника, возбуждающего колебания и пьезоэлектрического датчика, принимающего аналоговый сигнал, соединенный с аналого-цифровым преобразователем [2], на выходе которого цифровой сигнал попадает в оперативную память персонального компьютера, где посредством программного обеспечения сигналы регистрируются, записываются, обрабатываются и анализируются [3].

При этом способ контроля и обнаружения дефектов поверхностей теплообмена и трубопроводных систем заключается в записи сигналов свободных колебаний с отложениями и сравнении их с сигналами свободных колебаний, прошедших через такие же поверхности,

заполненные такой же средой, но не имеющие отложений (принятые за эталон), и по этому сравнению судят о наличии отложений [4].

Данный способ контроля и обнаружения дефектов поверхностей теплообмена и трубопроводных систем испытан в ходе экспериментальных исследований. Расчетным и экспериментальным путем было выявлено, что с наличием отложений увеличиваются и собственные частоты колебаний поверхностей теплообмена [5].

Своевременный контроль поверхностей теплообмена, выявление отложений позволяют уменьшить затраты на энергию и, как следствие, сократить общие эксплуатационные затраты, а также повысить энергоэффективность и продлить срок службы [6].

Экспериментальные исследования, проведенные в рамках выполнения работ по государственному заданию Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-03-2023-291 от 28.02.2023 г.), подтверждают возможность применения предложенного способа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Гарнышова Е.В., Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В.* Оценка толщины отложений на внутренней поверхности теплообмена по затуханию собственных колебаний. ИВУЗ. Проблемы энергетики, 2020. Т. 22. № 4. С. 106-114.
2. *Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В., Гарнышова Е.В., Зиганшин Ш.Г.* Патент на полезную модель RU Устройство для контроля отложений на поверхностях теплообмена № 198469 U1, МПК G01B 5/00 Бюл. № 20. 13.07.2020.
3. *Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В., Гарнышова Е.В., Зиганшин Ш.Г., Загретдинов А.Р.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019615470 «2RSoundSA». Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26 апреля 2019.
4. *Shvetsov I.V., Garnyshova E.V., Izmaylova E.V., Vankov Y.V., Zagretdinov A.R.* Reducing labor input of monitoring condition of heat exchange equipment surfaces. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 939 (2020) 012072 doi:10.1088/1757-899X/939/1/012072.
5. *Гарнышова Е.В., Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В., Загретдинов А.Р.* Контроль отложений поверхностей теплообмена по анализу их частот колебаний. Сборник материалов 78-й Науч.-техн. конф. Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященной Дню радио. 2023 СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С. 83-87.
6. *Ваньков Ю.В., Измайлова Е.В., Гарнышова Е.В., Загретдинов А.Р.* Повышение энергоэффективности контролем трубопроводных систем. Казань: Издательство Казанского университета, 2022. 142 с.

## ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

© 2024 г. Евгения Вячеславовна Измайлова<sup>1\*</sup>, Е. В. Гарнышова<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup> – Казанский государственный энергетический университет, 420066 Казань, ул. Красносельская, д. 51

\* - [evgeniya-izmailova@yandex.ru](mailto:evgeniya-izmailova@yandex.ru); \*\* - [garnyshova@mail.ru](mailto:garnyshova@mail.ru)

По данным Минэнерго России почти 70 % трубопроводов имеют возраст более 25 лет, следствием чего является увеличение их повреждаемости. Большинство трубопроводов проложены под землей, поэтому особый интерес представляют методы и средства диагностики, которые позволяют определить техническое состояние труб по всей длине, без вскрытия трассы.

Наиболее распространенным является акустический метод неразрушающего контроля, а именно акустической эмиссии (АЭ), для диагностики трубопроводов подземной прокладки, при использовании которого с помощью виброакустических датчиков происходит регистрация, запись и дальнейшая обработка сигналов на компьютере [1, 2].

В большинстве случаев определение координат источников АЭ основано на измерении разницы во времени прихода (РВП) сигналов от одного источника на разнесенные в пространстве приемные преобразователи АЭ [3]. Схемы расположения датчиков могут быть различными, но удобнее всего размещение их в колодцах (рис. 1), поскольку они находятся на равном расстоянии друг от друга и нет необходимости вскрывать теплотрассу.

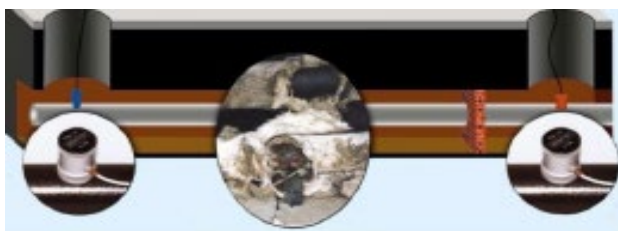


Рис. 1. Установка датчиков АЭ в колодцы для диагностики трубопроводов.

Авторами была разработана информационно-измерительная система [1-5], которая обеспечивает выполнение следующих функций: регистрацию и обработку сигналов, поступающих от датчиков, определение наличия дефекта и его характера, определение остаточного ресурса исследуемого участка трубопровода, определение координат источников АЭ по РВП сигнала, запись и вывод в отчет информации о состоянии исследуемого участка трубопровода.

Правительство Российской Федерации законодательно зафиксировало необходимость создания электронных моделей систем теплоснабжения городов. Под электронной моделью понимается математическая модель этой системы, привязанная к топографической основе

поселения, предназначенная для имитационного моделирования всех процессов, протекающих в ней.

На базе электронной модели, в частности в геоинформационной системе Zulu ООО «Политерм» (рис. 2), решаются задачи анализа информации и визуализации в виде карт и схем, ведения диспетчерских журналов: заявок, повреждений, выполненных работ и т.д.

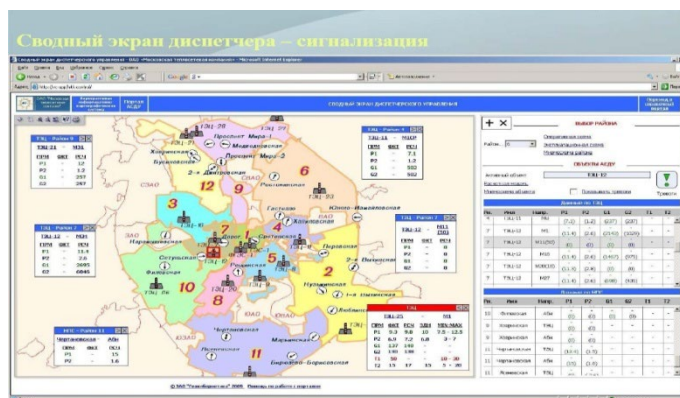


Рис. 2. Сводный экран диспетчера – сигнализация.

Размещение в колодцах датчиков акустической эмиссии и использование разработанного программного обеспечения позволяет в режиме реального времени определить координаты и характеристики дефекта и вывести эту информацию на сводный экран диспетчера [6].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В., Серов В.В., Горбунова Т.Г. / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012617704 «FlawDefiner». 27.08.2012.
2. Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В., Гарнышова Е.В., Зиганин Ш.Г., Загретдинов А.Р. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019615470 «2RSoundSA». Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26 апреля 2019.
3. Измайлова Е.В. Информационно-измерительная система и метод контроля трубопроводов на основе вейвлет фильтрации сигналов акустической эмиссии: Автореф. дис. канд. техн. наук. Казань: Изд-во КГЭУ, 2013. 16 с.
4. Серов В.В., Ваньков Ю.В., Зиганин Ш.Г., Акутин М.В., Измайлова Е.В. / Патент на полезную модель № 108551. Устройство для диагностирования трубопроводов. 20.09.2011.
5. Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В., Серов В.В., Загретдинов А.Р., Кондратьев А.Е. / Патент на полезную модель РФ № 129255, МПК G 01 N 29/00. Установка для мониторинга состояния трубопроводов / Оpubл. 20.06.2013, Бюл. № 17.
6. Ваньков Ю.В., Измайлова Е.В., Гарнышова Е.В., Загретдинов А.Р. Повышение энергоэффективности контролем трубопроводных систем. Казань: Издательство Казанского университета, 2022. 142 с.



## АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ГАЗОПРОВОДА В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА СТЕНКУ ТРУБЫ

© 2024 г. Надежда Юрьевна Трякина<sup>1\*</sup>, С. В. Трапезников<sup>1</sup>, А. С. Саломатин<sup>1</sup>,  
С. С. Кукушкин<sup>1\*\*</sup>, Я. Г. Смородинский<sup>2</sup>, В. Н. Костин<sup>2</sup>, О. Н. Василенко<sup>2</sup>,  
А. В. Михайлов<sup>2\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> - ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург», 620075 Екатеринбург,  
ул. Клары Цеткин, д. 14

<sup>2</sup> - ИФМ УрО РАН, 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 18

\* - [N.Tryakina@ekaterinburg-tr.gazprom.ru](mailto:N.Tryakina@ekaterinburg-tr.gazprom.ru); \*\* - [S.Kukushkin@ekaterinburg-tr.gazprom.ru](mailto:S.Kukushkin@ekaterinburg-tr.gazprom.ru);

\*\*\* - [mikhaylov@imp.uran.ru](mailto:mikhaylov@imp.uran.ru)

При обследовании газопровода, проходящего под ВЛ 110 кВ, в районе верхней образующей трубы были обнаружены дефекты, внешний вид которых имел признаки воздействия электрической дуги, в том числе наплывы и брызги металла, оплавленные края кратера дефектов. На внутренней стенке трубы в зоне каждого дефекта выявлены локальные потемнения, характерные для термического воздействия на металл (рис. 1).

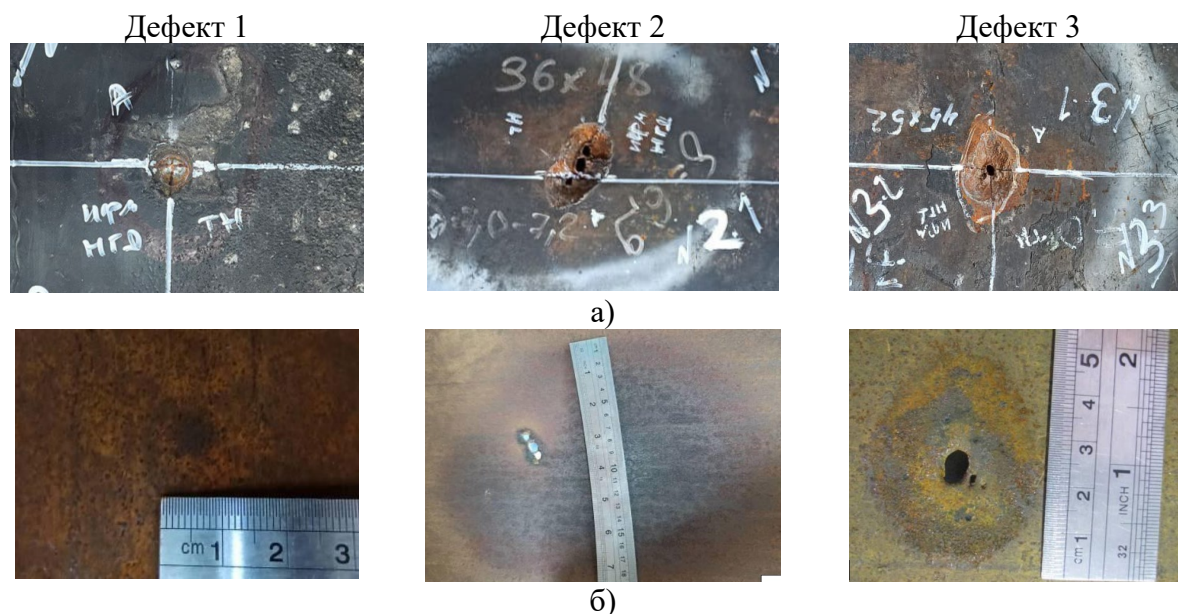


Рис. 1. Повреждения, выявленные при обследовании газопровода;  
а – наружная поверхность, б – внутренняя поверхность.

Было выдвинуто предположение о повреждении газопровода в результате воздействия мощного дугового разряда на стенку трубы с проплавлением металла и образованием сквозных дефектов. Для подтверждения предположения из трубы были вырезаны темплеты, проведены лабораторные исследования по определению структуры и элементного состава материала трубопровода в местах его повреждений, механические испытания. Рассмотрены сценарии возникновения мощных дуговых разрядов в грунте природного или техногенного характера.

По результатам локального спектрального анализа металла непосредственно в очаге дефектов установлено наличие повышенного количества примесных элементов (кремний, алюминий, калий, кальций, титан) вследствие переноса их из грунта при высокотемпературном воздействии (присутствие примесных элементов в грунте в месте укладки газопровода подтверждено качественным элементным анализом).

По результатам металлографии установлено, что структура металла трубы вдали от дефектов феррито-перлитная, характерная для горячекатанной низколегированной трубной стали. В зоне дефекта с малым проплавлением на глубину до 700 мкм от поверхности наблюдается слой металла, характеризующийся наличием участков столбчатой структуры, затем наблюдается переходная зона глубиной до 600 мкм со структурой неполного проплавления. Такая структура характерна для процессов формирования сварочной ванны. В случае образования дефектов с большим проплавлением на глубину до 700 мкм от поверхности установлено наличие зоны со структурой мартенсита, образование которого характерно для высокотемпературного нагрева с последующим резким охлаждением.

Электронно-микроскопический анализ показал, что на внешней поверхности трубопровода в кратере дефектов присутствуют множественные очаги оплавления металла, для которых характерны плавные линии внешних контуров, отдельные сформированные капли металла, напоминающие брызги (рис. 2). На внутренней поверхности трубопровода подобных явлений не наблюдается, что свидетельствует о высокотемпературном точечном воздействии на внешней поверхности трубы.

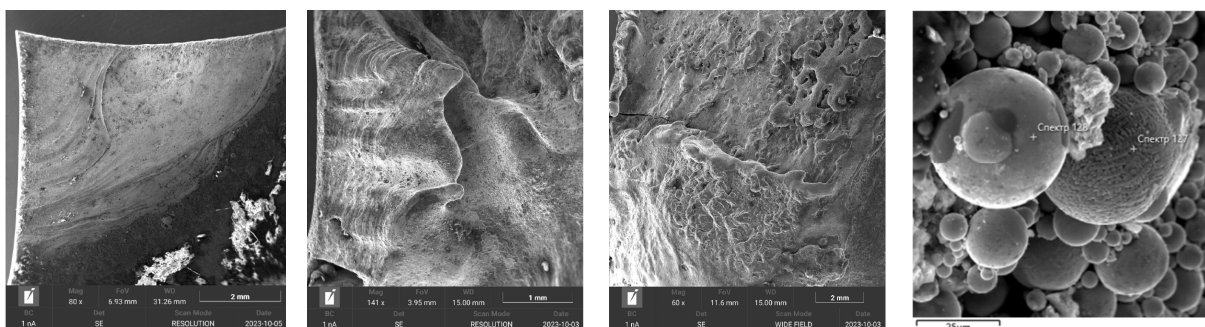


Рис. 2. Следы расплавления металла в зоне кратеров сквозных дефектов (электронная микроскопия).

Измерения твердости по сечению стенки трубы от поверхности вглубь образцов в зоне дефектов показали наличие резкого скачка твердости с 200-250 HV в основном металле до 450-600 HV в зоне закалочной структуры на поверхности.

Таким образом, по результатам выполненных исследований показано, что вероятным механизмом повреждения трубопровода с образованием дефектов явилось образование дугового разряда в грунте с оплавлением металла трубы вследствие природного или техногенного характера.

## ОСОБЕННОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ В КОМБИНИРОВАННЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ СТАЛЕЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

© 2024 г. Вера Александровна Барат<sup>1\*</sup>, А. Ю. Марченков<sup>1\*\*</sup>, В. В. Бардаков<sup>2</sup>, С. В. Ушанов<sup>1,2</sup>, Е. А. Лепшеев<sup>1,2</sup>, Г. Б. Свиридов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», 111250 Москва, ул. Красноказарменная, д. 17

<sup>2</sup> – ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ», 111024 Москва, Шоссе Энтузиастов, д. 20Б

\* - BaratVA@mpei.ru; \*\* - MarchenkovAY@mpei.ru

Предметом настоящей работы являются комбинированные сварные соединения сталей перлитного и аустенитного классов, которые используют при соединении трубопроводов и элементов энергетического оборудования. Различие свойств свариваемых материалов приводит к тому, что в зоне сплавления образуются структурные дефекты – карбидные и обезуглероженные диффузионные прослойки, наличие которых может критически влиять на прочностные свойства сварного соединения, уменьшая срок его эксплуатации и снижая значения предельных допустимых механических напряжений.

В работах [1-2] описаны результаты экспериментов по статическому растяжению образцов разнородных сварных соединений сталей 09Г2С и 12Х18Н10Т. Было показано, что при испытании образцов разнородных сварных соединений с диффузионными прослойками зависимость АЭ активности от времени содержит дополнительный экстремум, соответствующий пределу прочности ферритной фазы – 300 МПа. Подобный способ выявления диффузионных прослоек надежен и удобен в применении, однако может быть применен только в том случае, если значения пределов текучести перлитной и аустенитной стали не близки к 300 МПа. В противном случае разделение процессов пластической деформации основного металла и диффузионной прослойки оказывается затруднительным. В данной работе рассматривается универсальный метод выявления диффузионных прослоек на основании АЭ данных, который может быть применен при любом уровне механических характеристик свариваемых сталей.

В работе исследованы разнородные сварные соединения сталей 20 и 12Х18Н10Т, с пределами текучести  $\sigma_T=321$  МПа и  $\sigma_T=270$  МПа соответственно. Образцы разнородных сварных соединений изготавливались аргонодуговой сваркой пластин толщиной 3 мм с использованием присадочной проволоки Sabaros SW146. Для получения диффузионных прослоек проводилась термическая обработка. Из полученных соединений были изготовлены плоские образцы, которые испытывались на статическое растяжение до разрушения.

На рис. 1 показаны зависимости АЭ активности, полученные при растяжении бездефектного образца и образца с диффузионными прослойками. При напряжении 300 МПа, соответствующем пределу прочности ферритной фазы, уровень АЭ активности для образцов с

диффузионными прослойками оказывается выше, чем для бездефектного образца, однако этот эффект проявляется на временных зависимостях не слишком явно.

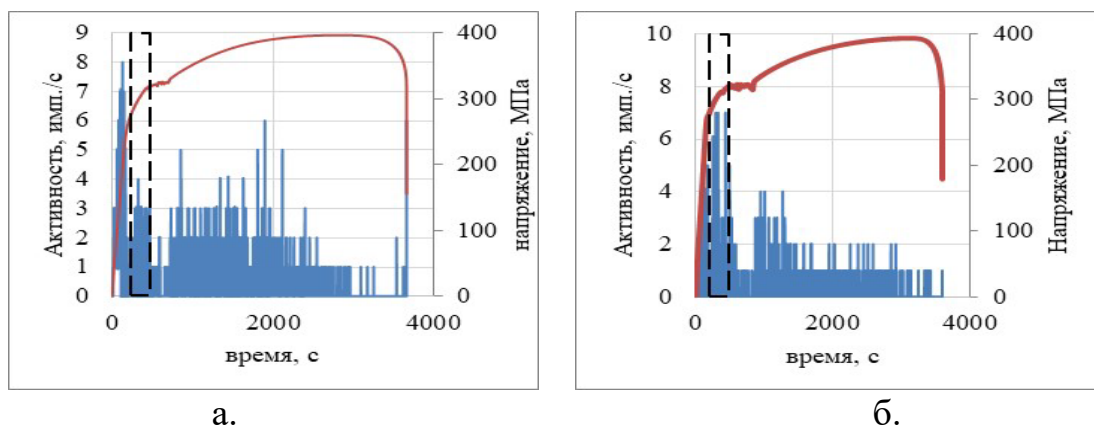


Рис. 1. АЭ активность от времени: для бездефектного сварного соединения (а) для сварного соединения с диффузионными прослойками (б).

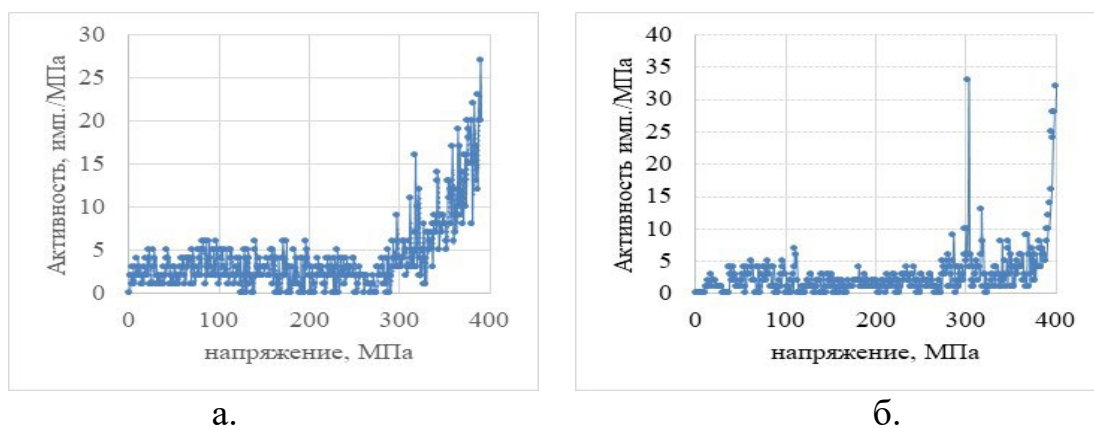


Рис. 2. АЭ активность от напряжения: для бездефектного сварного соединения (а), для сварного соединения с диффузионными прослойками (б).

На рис. 2 АЭ активность для бездефектного образца и образца с диффузионными прослойками показаны в зависимости от напряжения. В случае образцов с диффузионными прослойками наблюдается выраженное локальное повышение АЭ активности при напряжении 300 МПа, соответствующем пределу прочности ферритной фазы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00657, <https://rscf.ru/project/23-29-00657/>

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Барат В.А., Марченков А.Ю., Карпова М.В., Бардаков В.В., Ушанов С.В. Применение метода акустической эмиссии для обнаружения диффузионных прослоек в разнородных сварных соединениях // Контроль. Диагностика. Т. 26. № 10(304). С.4—10.
2. Barat V., Marchenkov A., Bardakov V., Karpova M., Zhgut D., Elizarov S. Features of Acoustic Emission in Tensile Testing of Dissimilar Welded Joints of Pearlitic and Austenitic Steels // Appl. Sci. 2021. Iss. 11. P. 11892.

## АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ КОНЪЮНКТИВНОГО И ДИЗЪЮНКТИВНОГО СИНТЕЗА ДЛЯ АНАЛИЗА ГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ОДНИМ ИЛИ НЕСКОЛЬКИМИ МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

© 2024 г. Виктор Юрьевич Шпильной<sup>1\*</sup>, Д. А. Дерусова<sup>1\*\*</sup>, К. Р. Беликов<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – НИ ТПУ, 634050 Томск, ул. Ленина, д. 30

\* - [baltamos@tpu.ru](mailto:baltamos@tpu.ru), [vshpilnoy@list.ru](mailto:vshpilnoy@list.ru); \*\* - [red@tpu.ru](mailto:red@tpu.ru); \*\*\* - [rkb3@tpu.ru](mailto:rkb3@tpu.ru)

Повышение требований, предъявляемых к качеству и безопасной эксплуатации изделий, вызванных их широким применением во многих областях сказывается на требованиях, предъявляемых к эффективности методов неразрушающего контроля (НК) [1,2]. Каждый из методов НК имеет ограничения, связанные с лежащими в основе метода физическими принципами. В качестве одного из способов нивелирования указанных ограничений может быть использован синтез результатов различных методов контроля, который позволяет компенсировать недостатки и выделить достоинства, с целью повышения качества НК, а также достоверности исследований. Развитие методов синтеза данных позволяет не только дополнять информацию при дефектовке материалов, но и интерпретировать данные, что повышает практическую значимость результатов контроля.

Ранее [3] нами было разработано программное обеспечение (ПО) DeFinder, позволяющее проводить анализ графических изображений, полученных в результате проведения одного или нескольких методов НК. В ПО производятся следующие операции: кадрирование изображения, выделение дефектных зон, применение операции дизъюнкции или конъюнкции, а также расчет площади дефектных зон на любом этапе исследования. Указанные процедуры позволяют проводить анализ данных, однако не включают алгоритмов синтеза изображений. В связи с этим, в рамках настоящей работы проведено усовершенствование ПО путем добавления функции импликации данных. Данная операция позволяет использовать результаты с разной степенью значимости в качестве основных и дополняющих. В рамках импликации программа генерирует итоговое изображение из двух исходных, выделяя отдельные зоны: дефектную область (оба метода показывают дефект), возможную дефектную область (дефект есть только в результатах основного метода) и бездефектную область (оба метода показали отсутствие дефекта). Указанные алгоритмы позволяют проводить синтез графических изображений, полученных в результате проведения одного или нескольких методов НК.

Апробация усовершенствованного ПО была проведена на примере анализа данных, полученных методами лазерной виброметрии и теплового контроля в ходе исследования ударного повреждения (энергия 20 Дж) в углепластиковом композите (размер 100×75×1,5 мм<sup>3</sup>). Пример результатов контроля углепластикового композита двумя рассматриваемыми методами, а также их синтеза данных, приведены на рис. 1.

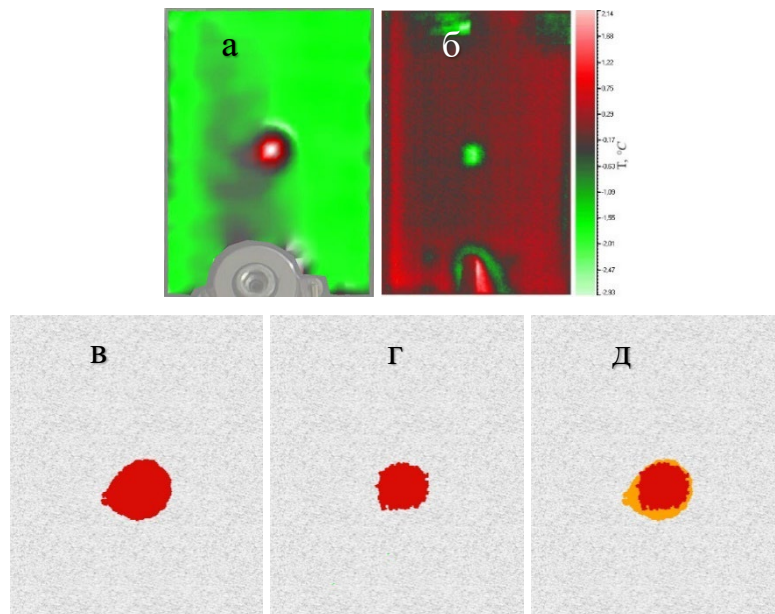


Рис. 1. Экспериментальные результаты лазерной виброметрии (а), теплового контроля (б), а также синтеза данных: дизъюнкции (в), конъюнкции (е) и импликации (д).

Анализ результатов синтеза данных (рис. 1) позволяет определить форму и область залегания дефекта, а также рассчитать их площадь. Показано, что синтез данных в рамках одного метода контроля позволяет уточнить размер и расположение дефекта, в то время как синтез данных нескольких различных методов НК позволяет повысить достоверность дефектometрии и сделать выводы о критичности повреждений. Помимо этого, частичная автоматизации поиска дефектных областей снижает вероятность возникновения ошибок диагностики дефектных и бездефектных зон, а также повышает точность измерений.

Работа выполнена в рамках гранта РФФ № 23-79-01199.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вавилов В.П. Тепловой неразрушающий контроль материалов и изделий (обзор) // Дефектоскопия. 2017. № 10. С. 34—57.
2. Balageas D, Maldague X. Thermal (IR) and Other NDT Techniques for Improved Material Inspection // J. of Nond. Evaluation. V. 35, No 1. 2016. P. 1—17.
3. Шпильной В.Ю. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020612786 от 03.03.2020. Выявление дефектов и расчет их площади по предоставленному изображению в заданном диапазоне оттенков.

## ИНФРАКРАСНАЯ ТЕРМОГРАФИЯ КОРУНДОВЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАСТИН

© 2024 г. **Сергей Евгеньевич Черных<sup>1\*</sup>**, **В. Н. Костин<sup>1\*\*</sup>**, **Ю. И. Комоликов<sup>1\*\*\*</sup>**

<sup>1</sup> – *Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, 620108 Екатеринбург,  
ул. Софьи Ковалевской, д. 18*

\* - *suo@mail.ru*; \*\* - *kostin@imp.uran.ru*; \*\*\* - *yikom@yandex.ru*

Целью исследования являлось изучение возможности обнаружения внутренних дефектов в керамических пластинах методом теплового контроля [1]. Представлены результаты исследования готовых изделий из корундовой керамики различными способами активного теплового контроля [2].

Изделия из корундовой керамики востребованы в различных отраслях: металлургии, станкостроении, аэрокосмической, электротехнической, оборонной, автомобильной, химической, медицинской, атомной энергетике и др. [3]. Неоднородность структуры, присутствие пор, раковин и трещин, скопления примесных дефектов в рассматриваемой керамике приводят к тяжелым авариям. Обнаружение таких дефектов методами неразрушающего контроля является чрезвычайно актуальным.

На данный момент инфракрасная термография неметаллов получила довольно интенсивное развитие [4]. Но в то же время работ по тепловому контролю корундовой керамики представлено крайне мало. Поэтому данное направление требует дальнейшей разработки, особенно при неразрушающем контроле конкретных готовых керамических изделий с заданными свойствами.

Образцы керамики 50×50×9 мм для проведения исследований были приготовлены методом шликерного литья. Для проведения теплового контроля были выбраны бездефектные и дефектные пластины. Дефект представлял собой воздушную полость, занимающую около 30 % площади образца, и соответствующее утонение материала в этой области до 30 %.

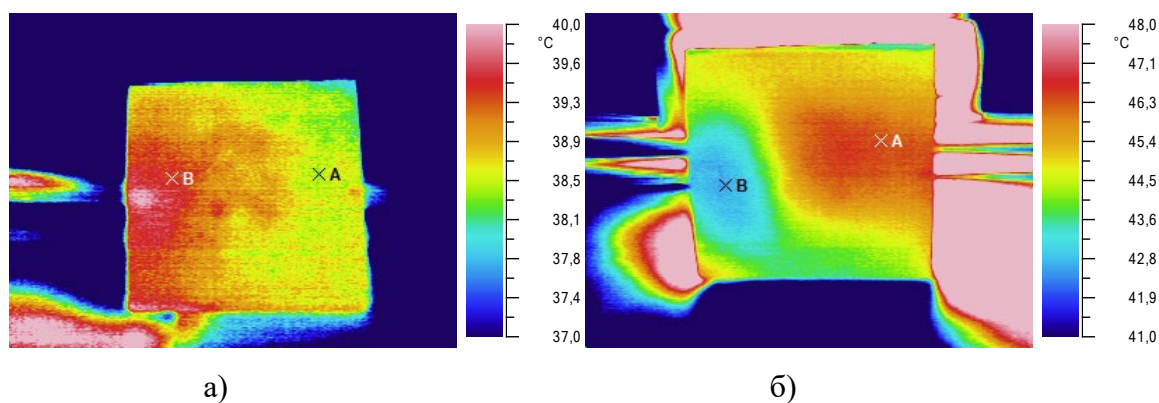


Рис. 1. Образец с внутренним дефектом (область т. В) в виде воздушной полости:  
а) – при одностороннем тепловом контроле, б) – при двустороннем тепловом контроле.

Термографирование образцов проводили при различных способах тепловой стимуляции. В первой части испытаний при одностороннем (рис. 1а) и двустороннем тепловом контроле (рис. 1б) в качестве источника тепловой стимуляции применялся фен, обеспечивающий поток горячего воздуха.

Во второй части испытаний для тепловой стимуляции керамических образцов применялась металлическая пластина, нагреваемая переменным магнитным полем соленоида, обеспечивая таким образом двусторонний тепловой контроль (рис. 2а).

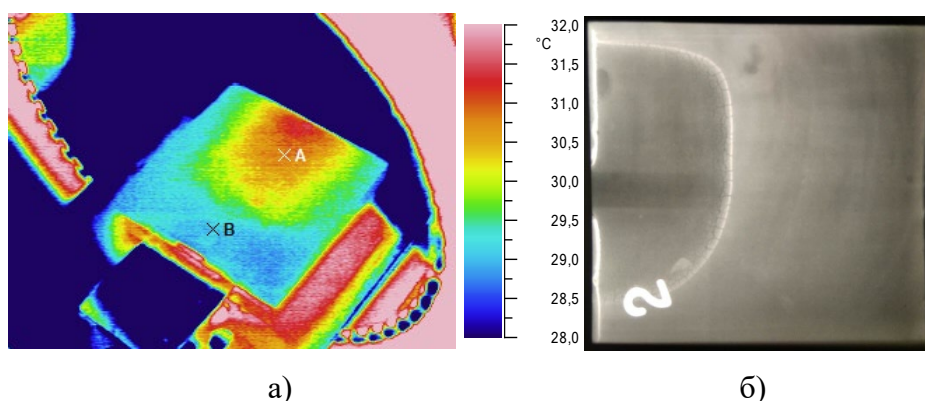


Рис. 2. а) – образец с внутренним дефектом (область т. В) в виде воздушной полости при двустороннем тепловом контроле, б) – рентгеновский снимок образца с дефектом (левая часть снимка).

Установлено, что как при одностороннем тепловом контроле, так и при двустороннем при использовании различных способов тепловой стимуляции в рассматриваемых керамических пластинах возможно обнаружение внутренних дефектов типа воздушной полости (рис. 2б).

Результаты исследований показывают, что активный тепловой метод неразрушающего контроля может быть использован для диагностики целостности пластин из корундовой керамики и обнаружения внутренних несплошностей, которые могут образовываться в процессе производства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Вавилов В.П.* Неразрушающий контроль: справочник / В 7 т. Т. 5. В 2 кн. Кн. 1 / Под общ. ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 2004. 418 с.
2. *Vavilov V.P.* Thermal nondestructive testing of materials and products: a review // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2017. V. 53, No. 10. P. 707–730.
3. *Жолудев Д.С., Григорьев С.С., Панфилов П.Е., Зайцев Д.В.* Обоснование использования керамики на основе оксида алюминия с помощью изучения её механических свойств // *Современные проблемы науки и образования.* 2014. № 3. С. 520.
4. *Вавилов В.П.* Тепловой неразрушающий контроль: развитие традиционных направлений и новые тенденции (обзор) // *Дефектоскопия.* 2023. № 6. С. 38–58.



## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФОРМЫ ДЕФЕКТА ФЕРРОМАГНИТНОЙ ПЛАСТИНЫ ПУТЕМ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ МАГНИТОСТАТИКИ И СЕРИИ ПРЯМЫХ ЗАДАЧ

© 2024 г. Андрей Владимирович Никитин<sup>1\*</sup>, Л. В. Михайлов<sup>1\*\*</sup>,  
А. В. Михайлов<sup>1\*\*\*</sup>, Ю. Л. Гобов<sup>1\*\*\*\*</sup>, В. Н. Костин<sup>1\*\*\*\*\*</sup>, Я. Г. Смородинский<sup>1\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – ИФМ УрО РАН, 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 18

\* - an@imp.uran.ru; \*\* - mikhaylov\_lv@imp.uran.ru; \*\*\* - mikhaylov@imp.uran.ru;

\*\*\*\* - go@imp.uran.ru; \*\*\*\*\* - kostin@imp.uran.ru; \*\*\*\*\* - jack.sm@mail.ru

Работа посвящена задаче восстановления формы границы металла в зоне поверхностного дефекта пластины из магнитомягкого ферромагнетика по измеренным компонентам магнитного поля при одностороннем доступе к пластине. Это означает, что магнитное поле может быть измерено как над бездефектной поверхностью металла, так и над поверхностью с дефектом.

На начальном этапе развития неразрушающего контроля магнитным методом предполагалось, что при помощи различных подходов, путем сравнения топографии измеренного магнитного поля над поверхностью объекта контроля, содержащего дефект, с топографией поля эталонного дефекта (модельного дефекта во внешнем намагничивающем магнитном поле, с рассчитанной топографией магнитного поля рассеяния) удастся определить тип и геометрические параметры формы обнаруженного дефекта. Однако большое разнообразие дефектов не позволяет устойчивым образом решить такую задачу. Непосредственное восстановление границы металла в зоне дефекта по измеренным компонентам создаваемого им магнитного поля рассеяния связано с решением обратной геометрической задачи магнитостатики. В общем случае, обратные задачи некорректны, поскольку их решения могут быть многозначными или неустойчивыми к параметрам задачи. Так, в работе [1] для обратной задачи магнитостатики была доказана ее принципиальная математическая неоднозначность в общем случае. Однако доказано [2], что, если из всего пространства функций, являющихся решениями обратной задачи, можно выделить компактное множество, для каждой функции которого существует и единственно решение прямой задачи, то на таком классе функций обратная задача является корректной (условная корректность по Тихонову), а такой класс функций — классом корректности. Следуя [3], можно доказать, что в трехмерном случае классом корректности являются формы дефектов, поверхность которых описывают функции, с заданной точностью представимые отрезком двойного ряда Фурье. Следует отметить, что это класс однозначных, непрерывных, ограниченных функций. В [4] показано, что для магнитомягких ферромагнетиков, используя магнитные линии, можно с хорошей точностью реконструировать локальную геометрию металла в зоне дефекта при условии, что форма дефекта представима функцией из класса корректности. Необходимо отметить, что для трещин и трещинообразных дефектов (в [5] имеется определение таких дефектов) невозможно реконструировать локальную

геометрию металла с помощью магнитных линий. В данной работе мы такие дефекты рассматривать не будем.

Таким образом, используя методику, описанную в [4, 6], можно восстановить локальную геометрию металла в зоне дефекта по измеренным над одной из поверхностей ферромагнитной пластины компонентам магнитного поля рассеяния дефекта. Стоит отметить, что дефект хорошо локализуется в плоскости пластины топографией измеренного магнитного поля.

В результате приближенного решения обратной геометрической задачи магнитостатики получим форму реконструированного дефекта и можем решить прямую задачу по вычислению магнитного поля от него. Далее можно определить расстояние между множествами измеренного в точках над поверхностью пластины величинами магнитного поля и рассчитанного в этих точках величинами магнитного поля (например, по метрике  $C$ , [7]). Минимальное расстояние между этими множествами соответствует наилучшему приближению реконструированного дефекта к реальному.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», Г.р. №122021000030-1).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дякин В.В., Кудряшова О.В., Раевский В.Я. К вопросу корректности прямой и обратной задачи магнитостатики. Часть 2 // Дефектоскопия. 2018. V. 10. P. 15—25.
2. Лаврентьев М.М. О некоторых некорректных задачах математической физики. М.: СО АН СССР, 1962.
3. Кротов Л.Н. Моделирование обратной геометрической задачи магнитостатики в магнитном контроле. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, ПГТУ, Пермь, 2004.
4. Никитин А.В., Гобов Ю.Л., А. В. Михайлов А.В., Михайлов Л.В. Методика решения обратной геометрической задачи магнитостатики для поверхностных дефектов магнитомягкого ферромагнетика // Дефектоскопия. 2022. V. 58. P. 24—34.
5. Specifications and requirements for in-line inspection of pipelines. 2016. <https://pipelineoperators.org/>.
6. Никитин А.В., Михайлов А.В., Михайлов Л.В., Гобов Ю.Л., Костин В.Н., Смородинский Я.Г. Область применимости методики построения линий магнитной индукции для дефектометрии протяженных объектов // Дефектоскопия. 2023. V. 59. P. 51—59.
7. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. Москва: Изд. «Наука», главная редакция физ.-мат. литературы, 1986. 285 с.

## ОПТИМИЗАЦИЯ НАМАГНИЧИВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДЕФЕКТΟΣКОПА БУРИЛЬНЫХ ТРУБ

© 2024 г. Леонид Владимович Михайлов<sup>1\*</sup>, Ю. Л. Гобов<sup>1\*\*</sup>, А. В. Михайлов<sup>1\*\*\*</sup>,  
А. В. Никитин<sup>1\*\*\*\*</sup>, Я. Г. Смородинский<sup>1\*\*\*\*\*</sup>, В. Н. Костин<sup>1\*\*\*\*\*</sup>  
<sup>1</sup> – ИФМ УрО РАН, 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 18  
\* - [mikhaylov\\_lv@imp.uran.ru](mailto:mikhaylov_lv@imp.uran.ru); \*\* - [go@imp.uran.ru](mailto:go@imp.uran.ru); \*\*\* - [mikhaylov@imp.uran.ru](mailto:mikhaylov@imp.uran.ru);  
\*\*\*\* - [an@imp.uran.ru](mailto:an@imp.uran.ru); \*\*\*\*\* - [jack.sm@mail.ru](mailto:jack.sm@mail.ru); \*\*\*\*\* - [kostin@imp.uran.ru](mailto:kostin@imp.uran.ru)

Магнитная дефектоскопия играет ключевую роль в неразрушающем контроле бурильных труб. Традиционно используемые в портативных дефектоскопах системы намагничивания, представляющие собой катушки, используемые рядом ведущих производителей магнитных дефектоскопов (Виматек, Россия; New Tech System, США и т.д.) [1, 2], несмотря на их широкое распространение, имеют ряд существенных недостатков. Эти недостатки заключаются в большом весе (до 30 кг), высокой потребляемой мощности (до 5 кВт), неоднородности создаваемого поля, а также в ограничении способов установки только с конца трубы. Целью данной работы являлось исследование возможных путей оптимизации систем намагничивания для уменьшения их массы, уменьшения энергопотребления и создания более однородного магнитного поля в рабочей области.

Ранее была разработана распашная (рис. 1) намагничивающая система, представляющая собой П-образный магнит и описанная в работе [3].



Рис. 1. Распашная система намагничивания.

Несмотря на то, что данная система показала многообещающие результаты с точки зрения своей эффективности намагничивания стенки трубы толщиной вплоть до 13 мм, ее вес остается достаточно большим. Наличие воздушного зазора (5 мм) между магнитопроводом и внешней стенкой трубы приводит к падению магнитного потенциала. Последующее улучшение данной намагничивающей системы представлялось в избавлении от сопротивления магнитной цепи

путем внедрения в систему ферромагнитных колес, которые служили бы для передачи магнитного потока по пути магнитопровод-стенка трубы, исключая воздушный зазор. Это позволило бы уменьшить массу намагничивающей системы. Был проведен ряд расчетов, в результате которого была разработана 3D-модель намагничивающей системы с ферромагнитными колесами, имеющей меньший вес. Однако расчеты методом конечных элементов показали незначительное уменьшение энергопотребления. Также недостаток данной системы заключается в ее низкой проходимости: колеса будут упираться в высадку на конце трубы с наружной высадкой, из-за чего останутся участки, не прошедшие контроль.

Выпускаемые в настоящее время постоянные магниты NdFeB обладают энергией большей, чем электромагниты. Поэтому намагничивающие системы, состоящие из постоянных магнитов, могут быть эффективными даже в присутствии в магнитной цепи достаточно большого воздушного зазора (15 мм). Результаты показали, что намагничивающая система с постоянными магнитами будет иметь вес вдвое меньший, чем система с электромагнитом, создающая аналогичное поле. Также такая система позволит контролировать всю длину тела трубы. Постоянные магниты не требуют расхода электроэнергии. Без серьезных трудозатрат возможно сконструировать распашную систему намагничивания для удобства установки ее на трубу.

Таким образом, оптимизацией намагничивающей системы путем замены катушки на современные постоянные магниты NdFeB возможно снизить массу дефектоскопа, свести к минимуму его энергопотребление, получить более однородное магнитное поле в рабочей области, а также сохранить проходимость прибора на уровне систем, использующих катушки намагничивания.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», Г.р. № 122021000030-1).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Портативная установка контроля бурильных труб магнитными методами неразрушающего контроля МАГПОРТАБУР. URL: <https://www.vimatec.ru/index.php/ru/produktsiya/rasseyanie-magnitnogo-potoka/oborudovanie-metoda-magnitnogo-rasseyaniya/218-portativnaya-ustanovka-kontrolya-burilnykh-trub-magnitnymi-metodami-nerazrushayushchego-kontrolya-magportabur-2>.
2. Drill Pipe Inspection System. URL: [http://www.newtechsystems.com/vedaq\\_2000.htm](http://www.newtechsystems.com/vedaq_2000.htm).
3. *Mikhailov A.V., Gobov Yu.L., Nikitin A.V., Popov S.E., Mikhailov L.V., Antokolsky L.I.* Simulation of a closed-loop magnetizing system for a portable drill pipe magnetic flaw detector // AIP Conf. Proc. 2022. V. 2466 (1). P. 040009.

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

© 2024 г. Артем Сергеевич Голев<sup>1\*</sup>, К. В. Гоголинский<sup>2\*\*</sup>, К. И. Доронин<sup>3\*\*\*</sup>,  
А. С. Уманский<sup>3\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – ООО «Константа», 198097 Санкт-Петербург, Огородный пер., д. 21, лит. А

<sup>2</sup> – НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, 188300 Лен. область, Гатчина,  
мкр. Орлова роща, д. 1.

<sup>3</sup> – ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»,  
199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2

\* - [artemgolev1999@gmail.com](mailto:artemgolev1999@gmail.com); \*\* - [nanoscan@yandex.ru](mailto:nanoscan@yandex.ru); \*\*\* - [doronin.k.i@mail.ru](mailto:doronin.k.i@mail.ru);

\*\*\*\* - [refreshermd@gmail.com](mailto:refreshermd@gmail.com)

Целью данной работы является анализ методик расчета модуля упругости материалов при динамическом инструментальном индентировании (ДИИ) [1]. Настоящее исследование проводится в рамках совершенствования метода ДИИ и разработки прибора для безобразцового неразрушающего контроля механических свойств материалов и изделий [2].

Для получения численных значений модуля упругости  $E_{ii}$  при анализе диаграмм контактное усилие – глубина внедрения  $P(h)$  рассматривается 3 методики: методика инструментального индентирования (ИИ) в соответствии с ГОСТ Р 8.748-2011 [3], методика динамического инструментального индентирования (ДИИ), описанная в [1, 4], а также способ расчета параметров упругого взаимодействия по параметрам отпечатка, получаемого в процессе прямого измерения его геометрии (оптический). Основное различие данных способов – определение значения глубины остаточного отпечатка  $h_r$ : метод ИИ предполагает его определение через касательную к начальной области кривой разгрузки на графике  $P(h)$ , а метод ДИИ использует выражение для его расчета через остаточную глубину  $h_f$  и максимальную глубину внедрения  $h_{max}$ . Основой для расчета параметров ударно-контактного взаимодействия при оптическом способе служит определение проекционной площади  $A_p$  и контактной глубины  $h_c$  отпечатка по измеренному с помощью оптического микроскопа значению радиуса  $r$  отпечатка.

В качестве объекта испытаний выступают три материала: стали 20X25H20C2 и 20X23H18 с разной твердостью (319 HV0,2 и 189 HV0,2 соответственно), а также сплав безоловянной бронзы БрАНЖНМц9-4-4-1 (твердость 134 HV0,2). Сигнал модифицированного преобразователя для измерения твердости по шкале Либа [2], записанный с частотой 15 МГц с помощью осциллографа Keysight Technologies DSOX2002A, обрабатывался в математическом пакете MATLAB для построения зависимости  $P(h)$  (рис. 1). Полученные значения модуля упругости  $E_{ii}$  представлены в таблице 1.

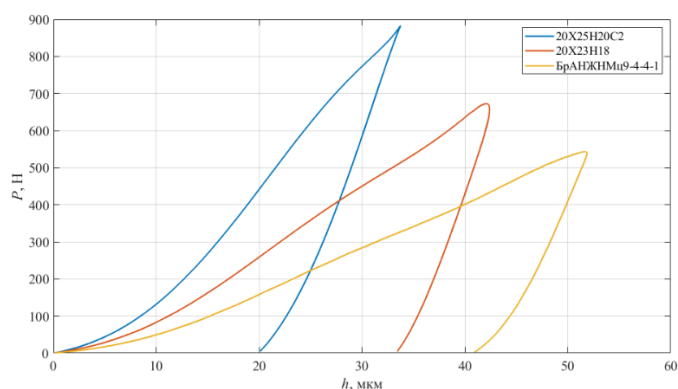


Рис. 1. Полученные диаграммы  $P(h)$ .

Таблица 1

**Значения модуля упругости  $E_{it}$ , ГПа**

Материал	ИИ	ДИИ	Оптический	Справочное
20X25H20C2	154	181	148	206
20X23H18	132	176	234	206
БрАНЖНМц9-4-4-1	78	91	62	106

Результат, наиболее близкий к табличным значениям (с отклонением 13-15 %), демонстрирует метод ДИИ, описанный в ГОСТ Р 56474-2015. Значения, полученные при помощи измерения радиуса отпечатка  $r$ , крайне чувствительны к ошибке его измерения. При их анализе выявлено, что погрешность измерения радиуса на 1 % вызывает ошибку значения модуля упругости на 12 %. Для диаграмм  $P(h)$ , получаемых на материалах с разным отношением значений модуля упругости к твердости, наблюдаются различия в области перехода от нагружения к разгрузке (рис. 1). Для повышения точности определения механических свойств рассматриваемым методом следует провести компьютерное моделирование для определения динамики упруго-пластической деформации при ударном взаимодействии.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Крень А.П., Протасеня Т.А. Определение физико-механических характеристик изотропного пирографита по параметрам динамического индентирования // Дефектоскопия. 2014. № 7. С. 51—59.
2. Umanskii A.S., Gogolinskii K.V., Syasko V.A., Golev A.S. Modification of the Leeb Impact Device for Measuring Hardness by the Dynamic Instrumented Indentation Method // Inventions. 2022. 7. DOI: 10.3390/inventions7010029.
3. ГОСТ Р 8.748-2011 (ИСО 14577-1:2002) Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик металлов при инструментальном индентировании.
4. ГОСТ Р 56474-2015. Системы космические. Контроль неразрушающий физико-механических свойств материалов и покрытий космической техники методом динамического индентирования. Общие требования.

## ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ГРАДУИРОВКИ И ПОВЕРКИ ДВУХПАРАМЕТРОВЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ТОЛЩИНОМЕРОВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

© 2024 г. Михаил Владимирович Сясько<sup>1\*</sup>, И. П. Соловьев<sup>1</sup>, П. В. Соломенчук<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Санкт-Петербургский государственный университет,

199034 Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7–9.

<sup>2</sup> – ООО «Константа», 198098 Санкт-Петербург, Огородный пер., д. 21.

\* - *m.syasko@gmail.com*

Для измерения толщины диэлектрического покрытия (ТП) на немагнитном металлическом основании применяется амплитудный метод вихретокового вида неразрушающего контроля [1]. На результаты измерений оказывают влияние мешающие параметры, в частности удельная электрическая проводимость основания ( $\sigma$ ). Для проведения измерения ТП с учетом  $\sigma$  разработан метод двухпараметровой обработки сигналов амплитудно-фазового вихретокового преобразователя (ВТП) [2, 3].

Традиционно, для градуировки ВТП используются меры ТП, представляющие собой плоскопараллельные пластиковые пластины, поверяемые с применением контактного длинномера. Градуировка производится путем последовательной установки ВТП на одну или несколько мер ТП, уложенных на образцовое основание (ОО),  $\sigma$  которого соответствует некому выбранному среднему значению. Для градуировки толщиномера, реализующего двухпараметровый метод измерения ТП, необходимо выполнить градуировку с использованием не одного, а нескольких ОО, значения  $\sigma$  которых будут разными и перекрывать весь диапазон актуальных значений  $\sigma$ .

Двухмерная градуировочная характеристика с использованием нескольких ОО кратно увеличивает трудоемкость процедуры градуировки. Для устранения этой проблемы предлагается использовать установку-имитатор толщины диэлектрического покрытия (УИТП), рис. 1.

УИТП состоит из прецизионного линейного актуатора, сервопривода, базовой несущей конструкции и программного обеспечения, обеспечивающих проведение автоматизированной процедуры градуировки. При градуировке ОО укладывается в ложемент. Производится перемещение ОО вниз до момента касания контактной поверхности ВТП. Определение момента касания производится с использованием сигнала, сформированного тензодатчиком. Для вычисления координат точки касания применяется макрос движения. ОО подводится в точку, соответствующую значению нуля, после чего производится ступенчатое перемещение ОО вверх по заданной управляющей программе. Считывание сигнала ВТП и его запись в градуировочную таблицу производится во время остановки по сигналу достижения заданной позиции, сформированному серводрайвером. При достижении ОО положения, соответствующего пределу

измерения ВТП, производится замена ОО вручную на следующее, имеющее другое значение  $\sigma$ , после чего цикл повторяется для каждого ОО.

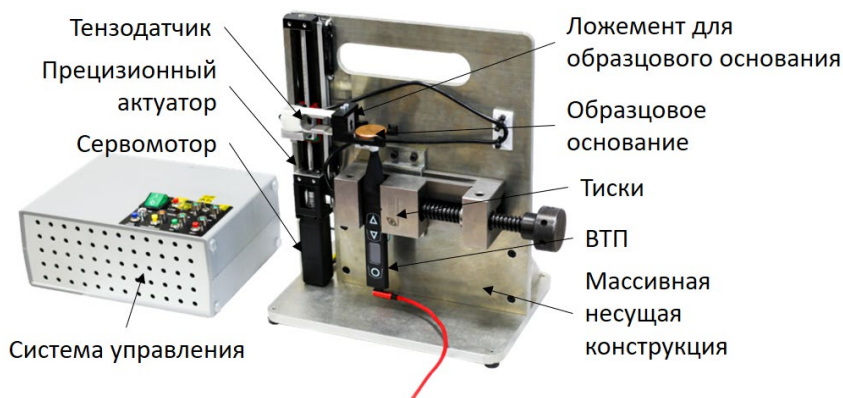


Рис. 1. Конструкция установки-имитатора толщины покрытия.

Проведено исследование погрешности УИТП с применением средств измерения высокого класса точности – инкрементного преобразователя линейных перемещений Sylcom P12D HR.

Оценена погрешность УИТП, определяемая её конструктивными особенностями:

- погрешность выставления нуля характеризуется постоянным смещением от 5 до 15 мкм, определяемым весом ОО, прецизионность имеет размах 1,1 мкм и СКО 0,2 мкм;
- гистерезис перемещения каретки составляет 3...4 мкм и определяется весом ОО;
- дифференциальная нелинейность составляет  $\pm 3$  мкм;
- влияние остальных источников погрешности исчезающе мало.

Для устранения влияния упомянутых источников погрешности УИТП процедура градуировки ВТП имеет следующие особенности:

- для устранения влияния погрешности выставления нуля производится вычисление действительного значения нуля путем анализа тренда сигнала ВТП;
- для устранения влияния гистерезиса применяется заблаговременное перемещение каретки, выбирающее гистерезис, с последующим монотонным перемещением ОО;
- для устранения влияния дифференциальной нелинейности применяется калибровка винта ШВП и компенсация его погрешности в процессе градуировки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р ИСО 2360-2021 Неэлектропроводящие покрытия на немагнитных электропроводящих металлических основаниях. Измерение толщины покрытия. Амплитудный вихретоковый метод.
2. Syasko M. и др. Technique for Multi-Parameter Signal Processing of an Eddy-Current Probe for Measuring the Thickness of Non-Conductive Coatings on Non-Magnetic Electrically Conductive Base Metals // Appl. Sci. 2023. V. 13. P. 5144.



## НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ДИФРАКТОМЕТРЕ «СТРЕСС»

© 2024 г. Иван Дмитриевич Карпов<sup>1\*</sup>, В. Т. Эм<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup> – НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1  
\* - [idkarpov@yandex.ru](mailto:idkarpov@yandex.ru); \*\* - [vtem9@mail.ru](mailto:vtem9@mail.ru)

Нейтронный метод является мощным инструментом для исследования внутренних механических напряжений в объёмных металлических изделиях. Сочетание высокой проникающей способности нейтронов и чувствительности метода к деформациям кристаллической структуры материала позволяет определить 3 главные компоненты тензора напряжений непосредственно в толще образца.

Дифрактометр «СТРЕСС» на исследовательском реакторе ИР-8, НИЦ «Курчатовский институт» – специализированная установка, предназначенная для неразрушающих исследований напряжённо-деформированного состояния в поликристаллических образцах. Применяемая нейтронно-дифракционная методика измерений позволяет получать информацию о трёхмерном распределении остаточных напряжений в исследуемом объекте. В зависимости от материала образца, его размеров и целей эксперимента остаточные напряжения могут быть определены с точностью до  $\pm 30\text{-}50$  МПа и с пространственным разрешением от 0,2 до 4 мм. Максимальная толщина образца может достигать 50 мм для сталей и 150 мм для алюминиевых сплавов.

На дифрактометре «СТРЕСС» впервые нейтронным методом был исследован Х-образный сварной шов толщиной до 45 мм в пластине из высокопрочной стали. Было установлено, что максимальные растягивающие продольные напряжения сконцентрированы в двух разнесённых областях, расположенных вблизи поверхности шва по обеим сторонам пластины [1, 2].

По результатам исследования остаточных напряжений в сварном шве с низкотемпературным фазовым переходом (аустенит  $\rightarrow$  мартенсит) было показано, что вблизи поверхности такого сварного шва действительно сформировались сжимающие остаточные напряжения за счёт увеличения элементарной ячейки уже после кристаллизации расплава [3].

На дифрактометре «СТРЕСС» были проведены исследования остаточных напряжений в тонких пластинках, выращенных на жёсткой подложке методом прямого лазерного выращивания [4, 5]. Исследованные образцы имитировали производство реальных тонкостенных деталей больших линейных размеров. На основе экспериментальных данных была скорректирована математическая модель, применяемая для описания закономерностей формирования распределения остаточных напряжений в образцах такого типа.

По результатам исследования тонких (100 мкм) стальных лент, применяющихся в качестве подложки при изготовлении высокотемпературных сверхпроводников 2-го поколения [6], были обнаружены растягивающие остаточные напряжения в поперечном направлении и

сжимающие – в продольном. Выявленные остаточные напряжения были признаны одной из основных причин периодического разрушения многослойной структуры сверхпроводника в процессе производства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Karpov I.D. et al.* Study of Through-Thickness Stress Distribution in Steel Double-V Butt Weld // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2020. V. 14, № 1. P. S35—S41.
2. *Карпов И.Д., Эм В.Т., Карпов И.Г., Ильин А.В.*, Нейтрон-дифракционное исследование влияния закреплений и термообработки на остаточные напряжения в стальном сварном шве // Физика металлов и металловедение. 2022. Т. 123, № 9. С. 986—995.
3. *Wang H. et al.* Effect of tailored martensitic transformation in a thick weld: Residual stresses mitigation, heterogeneous microstructure, and mechanical properties // Materials Characterization. 2018. V. 144. P. 345—355.
4. *Karpov I.D. et al.* Neutron Diffraction Research of Residual Stress in Metal Plates Deposited on Rigid Substrate by DLMD Method // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2020. V. 14, № 1. P. S79—S81.
5. *Карпов И.Д., Эм В.Т., Рылов С.А., Иванов С.Ю., Земляков Е.В., Бабкин К.Д.*, Исследование остаточных напряжений в стальных пластинах, полученных методом прямого лазерного выращивания на жесткой подложке // Физика металлов и металловедение. 2023. Т. 124, № 5. С. 443—450.
6. *Карпов И.Д. и др.* Исследование внутренних напряжений в несущей ленте-подложке из нержавеющей стали AISI 310S для ВТСП проводов второго поколения методом нейтронной стресс-дифрактометрии // Журнал технической физики. 2020. Т. 90. №. 7.

## ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ТРАДИЦИОННЫХ И АДДИТИВНЫХ ПРОИЗВОДСТВ МЕТОДАМИ НЕЙТРОННОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

© 2024 г. Михаил Михайлович Мурашев\*, В. Т. Эм\*\*, В. П. Глазков\*\*\*

*Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, 123182 Москва,  
пл. Академика Курчатова, д. 1*

*\* - mihail.mmm@inbox.ru; \*\* - vtem@mail.ru; \*\*\* - vivadin@yandex.ru*

С начала XXI в. методы нейтронной визуализации нашли широкое применение в области материаловедения и неразрушающего контроля готовых изделий. Успехи в этих областях в большой степени связаны с развитием вычислительной техники и появлением высокоэффективных детекторных систем, а широта применения методов связана со свойствами нейтронов. Высокая проникающая способность тепловых нейтронов для большинства используемых в промышленности металлов (до 70 мм – Fe, Ni; до 80 мм – Ti, Cu; до 300 мм – Al) позволяет исследовать внутреннюю структуру изделий традиционных и аддитивных производств неразрушающими методами. Использование монохроматического нейтронного излучения с длиной волны  $\lambda$  от 2 до 5 Å позволяет визуализировать распределение фаз и наличие текстуры в кристаллических образцах, основываясь на дифракционных эффектах.

Начиная с 2016 года, на базе исследовательского реактора ИР-8 были созданы 2 современные экспериментальные установки нейтронной визуализации как на монохроматическом нейтронном пучке с изменяемой длиной волны, так и на полихроматическом.

Показаны возможности экспериментальных установок на реакторе ИР-8 НИЦ «Курчатовский институт» для исследований методами нейтронной визуализации внутренних дефектов размерами от 200 мкм в металлических изделиях, полученных с помощью традиционных и аддитивных технологий. Показано, что использование монохроматических (станция «ДРАКОН») и полихроматических (томограф «ПОНИ») нейтронных пучков позволяет получить взаимодополняющую информацию о внутренней структуре изделий.

*Данная работа выполнена на оборудовании УНУ НИК ИР-8.*

# СВЯЗЬ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТАЛЕЙ, ИМЕЮЩИХ РАЗМЕРНОСТЬ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, С ПАРАМЕТРАМИ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЕТЛИ ИХ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА

© 2024 г. Сергей Григорьевич Сандомирский<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> – Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск,

Академическая, д. 12

\* – sand\_work@mail.ru

Магнитные свойства многих сталей связаны с их фазовым составом (намагниченность  $M_s$  технического насыщения) и структурным состоянием (коэрцитивная сила  $H_c$ , остаточная намагниченность  $M_r$ ). Это явилось физической основой магнитного структурного анализа [1, 2]. Относительная погрешность  $\delta$  измерения  $H_c$  составляет  $\pm 2\%$ ,  $\delta$  измерения  $M_r$  и  $M_s$  не превышает  $\pm 3\%$ , а  $\delta$  измерения отношения  $K_r = M_r/M_s$  не превышает  $\pm 1\%$  [3]. Установлены зависимости влияния селективного изменения разных структурных факторов сталей на их  $H_c$  [1, 2]. Но  $H_c$  оказалась не пригодна для контроля температуры  $T_0$  отпуска закаленных изделий из сталей с содержанием углерода более  $0,3\%$  из-за ее слабой и неоднозначной зависимости от  $T_0$  в области  $400^\circ\text{C} \div 600^\circ\text{C}$ . Но многие изделия подвергаются отпуску в этом интервале температур. Поэтому разработка достоверного метода неразрушающего контроля качества термической обработки изделий из таких материалов стала одной из главных задач магнитного структурного анализа.

Для ее решения, в числе прочих магнитных параметров сталей, исследователи предложили измерять параметры, имеющие размерность магнитного поля: релаксационную коэрцитивную силу  $H_r$  материала и поле  $H_{\mu m}$ , при котором магнитная проницаемость материала максимальна. Автором показано [4–8], что результаты измерения этих параметров не применяют в магнитном структурном анализе из-за низкой точности измерения и тесной связи с  $H_c$  материала, которую можно измерить проще и точнее. Разработаны и обоснованы формулы, связывающие  $H_{\mu m}$  и  $H_r$  сталей с магнитными параметрами  $H_c$ ,  $M_r$  и  $M_s$  их предельной петли магнитного гистерезиса [5, 6]:

$$H_r \approx H_c [1 + 0,54(1 - K_r)^2],$$
$$H_{\mu m} \approx H_c \frac{1,44 - 0,055\tau H_c}{\sqrt{K_r}}, \text{ где } \tau = 1 \text{ м/кА.}$$

Современные исследователи предложили в качестве параметра, чувствительного к структуре сталей, использовать критическое поле  $H_{кр}$  [9, 10]. Поле  $H_{кр}$  определяли как абсциссу пересечения касательных от нулевого и от максимального полей к измеренной кривой безгистерезисного намагничивания материала. Но измерение этой кривой (и параметра  $H_{кр}$ ) сложно и неточно.

В работе на основании разработанного аналитического описания изменения намагниченности на безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного материала [11],

показано, что предложенный к измерению в [9, 10] магнитный параметр  $H_{кр}$  может быть рассчитан по результатам простого и точного измерения  $H_c$ ,  $M_r$  и  $M_s$ :

$$H_{кр} = H_c \frac{1-K_r}{K_r}.$$

Тем самым подтвержден сделанный в [8, 12] вывод, что любой магнитный параметр материала изделий, используемый в магнитной структуроскопии (в том числе и магнитные параметры, имеющие размерность напряженности магнитного поля), или любая их комбинация могут быть синтезированы из результатов измерения магнитных параметров  $H_c$ ,  $M_r$  и  $M_s$  предельной петли магнитного гистерезиса материала.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. *Михеев М.Н., Горкунов Э.С.* Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. М.: Наука, 1993. 252 с.
2. Неразрушающий контроль. Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. *В.В. Клюева*. Т. 6: В 3 кн. Кн.1. *В.В. Клюев* [и др.]. Магнитные методы контроля. М.: Машиностроение, 2006. 848 с.
3. Магнитные измерения / *Е.Т. Чернышев* [и др.]. М.: Изд. стандартов, 1969. 248 с.
4. *Сандомирский С.Г.* Анализ погрешности измерения поля максимальной магнитной проницаемости // Измерительная техника. 2011. № 12. С. 41—44.
5. *Сандомирский С.Г.* Оценочный расчет магнитного поля, при котором магнитная проницаемость достигает максимума // Электричество. 2012. № 7. С. 55—60.
6. *Сандомирский С.Г.* Расчет релаксационной коэрцитивной силы ферромагнитного материала // Электричество. 2010. № 7. С. 55—58.
7. *Сандомирский С.Г.* Анализ диапазона изменения релаксационной коэрцитивной силы сталей // Сталь. 2013. № 2. С. 47—51.
8. *Клюев В.В., Сандомирский С.Г.* Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей. М.: Изд. дом «СПЕКТР», 2017. 248 с.
9. *Сербин Е.Д., Костин В.Н.* О возможности оценки магнитострикционных характеристик объемных ферромагнетиков по их магнитным свойствам // Дефектоскопия. 2019. № 5. С. 31—36.
10. *Сербин Е.Д., Костин В.Н.* Определяемые формой петли гистерезиса критические поля, как перспективные параметры структуроскопии стальных изделий // XXIII Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике. Сборник трудов. 23–25 октября 2023 г. М.: Изд. дом «Спектр», 2023. С. 68—72.
11. *Сандомирский С.Г.* Определение безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного материала по параметрам предельной петли его магнитного гистерезиса // Электротехника. 2023. № 10. С. 55—60.
12. *Сандомирский С.Г.* Использование параметров предельной петли гистерезиса для синтеза структурочувствительных магнитных параметров сталей // Контроль. Диагностика. 2017. № 11. С. 26—31.

# РЕЗУЛЬТАТ МОДЕЛИРОВАНИЯ БЕЗГИСТЕРЕЗИСНОЙ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ МАГНИТНОГО СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА

© 2024 г. Сергей Григорьевич Сандомирский<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> – Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск,

Академическая, д. 12

\* - sand\_work@mail.ru

Безгистерезисное намагничивание материала [1] заключается в действии на него постоянным намагничивающим полем и переменным магнитным полем, доводящим материал до технического насыщения. После этого амплитуду переменного поля плавно уменьшают до нуля. Полученная кривая имеет большую крутизну в слабых полях и не имеет точки перегиба. Но для ее определения проводят полный цикл многочисленных измерений. Это усложняет определение безгистерезисной кривой намагничивания материала и снижает его точность.

Цель работы – упрощение определения безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного материала и ее использование для магнитного структурного анализа.

Для моделирования безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного материала воспользуемся тем, что она близка к линии, проходящей через средние точки горизонтальных хорд предельной петли гистерезиса [1–3]. Экспериментальная проверка показала [2], что при таком подходе погрешность определения безгистерезисной кривой намагничивания на начальном ее участке не превышает  $\pm 3\%$ .

Методика [4] моделирования безгистерезисной кривой намагничивания использует многократно подтвержденные аппроксимации зависимостей изменения намагниченности  $M$  ферромагнитного материала от напряженности  $H$  действующего намагничивающего поля на нисходящей (1) и восходящей (2) ветвях предельной петли магнитного гистерезиса ферромагнитного материала формулами Фрелиха:

$$M = \frac{M_r M_s (H + H_c)}{M_s H_c + M_r H}, \quad (1)$$

$$M = \frac{M_r M_s (H - H_c)}{H_c (M_s - 2M_r) + M_r H}. \quad (2)$$

Значения намагниченности  $M$  на нисходящей и восходящей ветвях петли магнитного гистерезиса соответствуют значения  $H_1$  и  $H_2$  намагничивающего поля (рис. 1), полусумма которых (с учетом их знака) равна напряженности поля  $H$  на безгистерезисной кривой намагничивания (рис. 1). Проведя преобразования, получили [4]:

$$M = \frac{M_r M_s H}{H_c (M_s - M_r) + M_r H}. \quad (3)$$

Введя обозначения  $K_r = M_r/M_s$ ,  $m = M/M_s$ ,  $h = H/H_c$  и преобразуя (3), получим:

$$m = [1 + (1 - K_r)/hK_r]^{-1}. \quad (4)$$

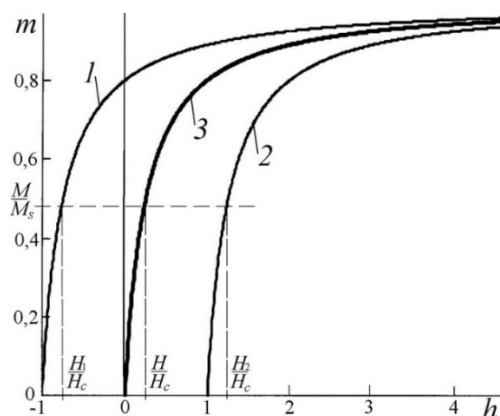


Рис. 1. Нисходящая (1) и восходящая (2) ветви предельной петли магнитного гистерезиса и безгистерезисная кривая намагничивания (3), построенные по формулам (1), (2), (4) для  $K_r = 0,8$

Формулы (3) и (4) получены математически точно на основании экспериментально обоснованных методики и зависимостей (1) и (2). На их основании получим выражение для внутреннего коэффициента  $N_i$  размагничивания ферромагнитного материала:

$$N_i = \frac{H_c(1 - K_r)}{M_r}. \quad (5)$$

В [5] рекомендовано при разработке методов магнитного структурного анализа определять параметры  $K_r$  и  $\xi = H_c/M_s$  материала. С учетом этого из (5):

$$N_i = \xi \frac{1 - K_r}{K_r}. \quad (6)$$

Тем самым в работе установлена связь (5), (6) сложного для измерения, но наиболее чувствительного к изменениям структуры ферромагнитного материала параметра  $N_i$  с параметрами  $K_r$  и  $\xi$  предельной петли магнитного гистерезиса материала.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Бозорт Р. Ферромагнетизм. М.: Изд. иностранной литературы, 1956. 784 с.
2. Сташков А.Н., Сомова В.М., Сажина Б.Ю. [и др.] Магнитный метод определения количества остаточного аустенита в мартенситно-стареющих сталях // Дефектоскопия. 2011. № 12. С. 36—42.
3. Takács J., Kovács G., Varga L.K. Internal Demagnetizing Factor in Ferrous Metals // Hindawi Publishing Corporation. Journal of Metallurgy. Vol. 2012. Article ID 752871.
4. Сандомирский С.Г. Определение безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного материала по параметрам предельной петли его магнитного гистерезиса // Электротехника. 2023. № 10. С. 55—60.
5. Сандомирский С.Г. Повышение структурной чувствительности остаточной намагниченности и коэрцитивной силы сталей // Дефектоскопия. 2023. № 8. С. 62—64.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ УПРУГИХ ВОЛН В ОБЛАСТИ ГРАНИЦЫ КОНСОЛИДИРОВАННОЙ СРЕДЫ

© 2024 г. К. Е. Аббакумов<sup>1\*</sup>, А. Бунаков<sup>1\*\*</sup>, Ирина Геннадьевна Сидоренко<sup>1\*\*\*</sup>  
<sup>1</sup> – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина), (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), 197022 Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, лит. Ф

\* - keabbakumov@etu.ru; \*\* - anton\_bunakov@mail.ru; \*\*\* - igsidorenko@etu.ru

Широкое внедрение ультразвуковых методов контроля в практику промышленных технических измерений существенно расширило представления исследователей о характере и свойствах обнаруживаемых в материалах и изделиях несплошностей. Это положительно сказывается на результатах анализа акустических трактов ультразвуковых приборов с внедренными в них моделями несплошностей естественного металлургического происхождения [1]. При этом важным оказывается учет состояния вещества несплошности, изменяющегося при температурной и деформационной обработке при технологическом переделе. Так, применительно к медным материалам, получаемым по технологии двойного вакуумного переплава, удалось установить существенные различия в свойствах графитовых включений в зависимости от степени раздробленности заполняющего вещества. Были подтверждены полученные ранее экспериментальные результаты, связанные с рациональным выбором параметров (в частности частоты ультразвука) контроля [2].

Применительно к задачам технических приложений ультразвуковых измерений к наиболее разработанным можно отнести модели разнообразных геоматериалов [3-8]. Известно, в частности, что почти все осадочные материалы и некоторые породы состоят из минеральных частиц несферической формы, соприкасающихся друг с другом при различной степени сцементированности. Ослабление, поглощение упругих волн в таких материалах происходит в основном посредством двух механизмов: 1) потери в матрице; 2) потери при взаимодействии включений с твердой фазой. Затухание в матрице может быть обусловлено внутренней неупругостью кристаллических зерен и контактным трением на границах соприкасающихся зерен и трещин. Внутренняя неупругость очень мала [3], и ей обычно пренебрегают. Наибольшее внимание уделяется исследованию поглощения за счет трения [3]. При контроле изделий энергомашиностроения представляет интерес оценка интервала вариации акустических характеристик шлаковых включений, заполняющих внутренние полости расслоений. По отношению к монолитному строению шлаков их данные известны [9]. В [3] показано, что учет раздробленного состояния вещества включений зернистой среды может носить резонансный характер, учитывая также наличие контактной жесткости зерен и вязкое трение в прилегающих слоях. Согласно теории Герца-Миндлина-Дигби [3, 4] упругие константы зернистых сред зависят



главным образом от контактов между выпуклыми поверхностями зерен, а контакты могут аппроксимироваться круговыми поверхностями определенного радиуса. Предполагалось, что при внешнем воздействии зерна в прилегающих друг к другу слоях сближаются, деформация происходит только в зоне контакта, причем рассматриваются только силы, действующие по нормали к сферическим поверхностям в точках контакта. При выводе аналитических соотношений для эффективных скоростей продольных и поперечных волн и их коэффициентов затухания учитывались такие параметры, как нормальная жесткость  $D_n$  в контактах между зернами,  $Q$  – добротность образующихся колебательных систем, закон распределения зерен по размерам в заданном диапазоне от  $r_{\max}$  до  $r_{\min}$ , потери в контактной области и частота ультразвука. С учетом введенных приближений в явном виде получены выражения для фазовых скоростей эффективных продольной и поперечной волн в консолидированной среде – шлаке, которые были проанализированы на основании численных оценок. Приведено решение дисперсионного уравнения для определения фазовой скорости эффективной поверхностной волны. Данные вычислений проанализированы для актуальных значений параметров модели несплошности. Результаты работы представляют интерес при поиске оптимальных режимов контроля изделий энергомашиностроения, содержащих несплошности (расслоения) соответствующих типов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Алешин Н.П., Бобров В.Т., Ланге Ю.В., Щербинский В.Г.* Ультразвуковой контроль: учеб. пособие / под. общ. ред. *В.В. Клюева*. М.: Издательский дом «Спектр», 2011. 224 с.
2. *Аббакумов К.Е., Вагин А.В., Сидоренко И.Г.* Акустические характеристики графитовых включений в листах из медного сплава, полученного по технологии двойного вакуумного переплава // Сборник статей 8-й Международной научно-технической конференции «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов», Могилев, 29-30 сентября, 2022. Изд-во Белорус.- Рос. ун-та, 2022. С. 11-16.
3. *Быков В.Г.* Поглощение упругих волн в тонком слое зернистой среды // Акустический журнал. 1997. Т. 45, № 3. С. 323-327.
4. *Johnson D.H., Toksoz M. N., Timur A.* Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks // Geophysics. 1979. V. 44, № 4. P. 691-711.
5. *Био М. А.* Обобщенная теория распространения акустических волн в диссипативных пористых средах // Механика. 1963. № 6. С.135-155.
6. *Быков В.Г., Николаевский В.Н.* Сейсмические волны в насыщенных пористых геоматериалах с вязкоупругой матрицей // Докл. АН. 1992. Т. 323, № 3. С. 446-451.
7. *Кобелев Ю. А.* К вопросу о поглощении звуковых волн в тонком слое // Акустический журнал. Т. 33, № 3. С. 507-509.
8. *Файзулин И.С., Шапиро С.А.* О затухании упругих волн в горных породах, связанном с рассеянием на дискретных неоднородностях // Докл. АН СССР. 1987. Т. 295, № 2. С.341-344.
9. *Кретов Е.Ф.* Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении / 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Издательство «СВЕН», 2007. – 296 с.

# УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ГИПОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА РАЗЛИЧНЫЕ БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ С ЦЕЛЬЮ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

© 2024 г. **Мария Сергеевна Емельянова<sup>1\*</sup>**, **Виталий Васильевич Муравьев<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup> – *ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», 426069 Ижевск,*

*ул. Студенческая, д. 7*

*\* - pmkk@istu.ru*

Существенным экологическим фактором, определяющим гармоничное развитие всех функциональных систем живого организма в месте его пребывания, является геомагнитное поле (ГМП), действующее в окружающей среде. Данная работа посвящена совершенствованию существующих методов и аппаратных средств с использованием магнитных полей (МП) для диагностики природной среды и исследованию влияния ослабленного магнитного поля на развитие биологических объектов [1].

Цель работы: совершенствование существующих методов и аппаратных средств с использованием магнитных полей для диагностики природной среды по результатам воздействия на биообъекты разного уровня, способствующее повышению экологической безопасности окружающей среды.

Разработан многоуровневый генератор МП, в котором одновременно можно провести опыты с несколькими уровнями ослабления магнитного поля Земли и за один эксперимент построить зависимость с небольшим интервалом квантования МП. В качестве объектов влияния ГМП выбраны представители различных царств (эмбрионы птиц, личинки пчел, семена растений). На базе данного генератора разработана методика магнитобиологического опыта. Оценены артефакты, которые появились в результате анализа условий эксперимента, такие как: поля рассеяния от решетки инкубатора, от мотора,двигающего решетку, от нагревателя. Особенно большое внимание было уделено полям от нагревателя, поскольку МП нагревателя (50 Гц) лежат в диапазоне возможных циклотронных резонансов, что помешало бы чистоте экспериментов.

Разработанный многоуровневый генератор позволяет создать градиент магнитного поля в горизонтальной плоскости при постоянной вертикальной составляющей. Данный генератор обеспечивает опыты с биологическими объектами в рабочей зоне не менее 0,25 м<sup>3</sup>. Применение в исследованиях разработанного многоуровневого генератора позволило сократить время экспериментов более чем в пять раз. Разработанные варианты конструкций многоуровневого генератора позволяют проводить разнообразные магнитобиологические опыты: в однородном и градиентном магнитных полях; с инверсией магнитного поля и переходом через нулевое значение; в комбинированных магнитных полях.

Проведено математическое моделирование магнитных полей в заданном объеме. Впервые проведено системное изучение биообъектов, развивающихся в различных магнитных условиях, на нескольких уровнях организации живой материи.

Определен допустимо возможный уровень ослабления магнитного поля, который не приводит к заметному ухудшению экологической безопасности окружающей среды и к патологическим изменениям в живом организме. Определены экологические уровни ослабления магнитного поля Земли, не приводящие к изменениям морфологических и структурных характеристик биообъекта. Впервые исследовано влияние различных уровней ослабления на морфометрические признаки и этологические критерии биообъектов. Обнаружены изменения анатомических показателей биообъектов в зависимости от уровня ослабления МП.

По итогам проведенных испытаний предложена и экспериментально подтверждена методика проведения магнитобиологического опыта в условиях инкубатора с использованием разработанного многоуровневого генератора градиентного поля в пределах от 1 до 100 А/м<sup>2</sup>. По результатам исследования изготовлена установка, позволяющая проводить опыты одновременно с несколькими биологическими объектами в МП, ослабленных до различных уровней, что сокращает сроки проведения экспериментального исследования в 5-10 раз. Наличие сопутствующих техногенных полей промышленной частоты не оказывает заметного влияния на онтогенез эмбриона.

Последствия развития биообъекта в слабом ГМП напрямую зависят от уровня его ослабления: чем сильнее ослаблено ГМП, тем заметнее становятся патологии в развитии на эмбриональной стадии онтогенеза. Установлено, что ослабление магнитного поля Земли более, чем в два раза, является экологическим уровнем, на котором становятся заметны морфологические и структурные изменения в онтогенезе биообъекта (на примере личинок пчел, эмбрионов птиц, семян тыквы).

Эмбрионы птиц, личинки пчел и семена тыквы, относящиеся к различным таксономическим группам, проявляют идентичную реакцию на ослабление ГМП, что дает возможность говорить о существовании схожих механизмов магниточувствительности данных биообъектов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ломаев Г.В., Емельянова М.С. Исследование соленоида как источника однородного магнитного поля в магнитобиологических опытах // Интеллектуальные системы в производстве: 2020. Т. 18, № 4. С. 47—53. – DOI 10.22213/2410-9304-2020-47-53.

## ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДЕМПФЕРА ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕГО ФОРМЫ

© 2024 г. Михаил Сергеевич Вечёра<sup>1\*</sup>, С. И. Коновалов<sup>2\*\*</sup>, Р. С. Коновалов<sup>2,3\*\*\*</sup>,  
Г. В. Ш.<sup>4\*\*\*\*</sup>, В. М. Цаплев<sup>2\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – ООО «Константа УЗК», 198097 г. Санкт-Петербург, Огородный пер., 21

<sup>2</sup> – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), 197022 Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5

<sup>3</sup> – Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031 Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9

<sup>4</sup> – School of Mechanical Engineering, Changwon National University, 51140 Changwon, Changwon National University Road 20, Republic of Korea

\* - vms@constanta.ru; \*\* - sikonovalov@etu.ru; \*\*\* - rskonovalov@etu.ru;

\*\*\*\* - ee.boris@changwon.ac.kr; \*\*\*\*\* - valery@convergences-fr.ru

Целью представленного исследования является изучение эффективности демпфера пьезоэлектрического преобразователя в зависимости от его геометрической формы. Исследован один из возможных вариантов построения демпфера – в виде усеченного конуса, образующая которого может иметь различный наклон по отношению к плоскости пластинчатого пьезоэлемента. Получены результаты исследования, связывающего геометрическую форму демпфера с эффективностью его работы, а также с эффективностью работы системы излучения-приема «в целом».

Механическое демпфирование получило широкое распространение при разработке пьезоэлектрических преобразователей, предназначенных для неразрушающего контроля [1, 2]. При этом необходимо отметить, что наибольшая эффективность демпфирования достигается в том случае, когда вносимые им в колебательную систему потери имеют чисто активный характер. Для этого необходимо исключить влияние сигналов, возвращающихся из толщи демпфера на пьезопластину в результате, например, отражений от его тыльной стороны. Вопрос влияния геометрической формы демпфера на его свойства слабо представлен в научно-технической литературе. Существующие публикации в основном сосредоточены на технологических аспектах изготовления демпферов [3, 4].

Авторами настоящей работы проведен комплекс исследований по оценке влияния формы описанного демпфера на его свойства. Работа проводилась в три этапа: натурное моделирование образцов демпферов с различающимся углом наклона образующей, проведение численного эксперимента в программе COMSOL, а также экспериментальное исследование изготовленных образцов в системе излучения-приёма.

Для экспериментальных исследований были изготовлены 30 образцов демпферов с различными углами наклона образующей. В качестве активного элемента выбраны пьезопластины диаметром 12 мм и частотами 2,5 и 1,25 МГц. Демпфирующий состав

изготавливался на основе смеси эпоксидной смолы и вольфрамового порошка в соотношении 1:1 по массе. Для проведения численного моделирования методом конечных элементов в программе COMSOL построена модель пьезопластины с конусным демпфером. На основе проведения численного расчета получена зависимость эффективности демпфирования от угла наклона боковой стенки демпфера. Предложен критерий определения эффективности демпфирования как отношение амплитуд электрических напряжений на пьезоэлементе для отраженной от тыльной стороны демпфера волны к поданному на пьезоэлемент. Для экспериментального исследования образцов в системе излучения-приема разработана установка, включающая в свой состав емкость с жидкостью и специальную оснастку для крепления образцов демпферов. При проведении эксперимента оценивалось изменение длительности зондирующего импульса (ЗИ) и отношения сигнал/шум.

Общие результаты исследований частично представлены на рис. 1.

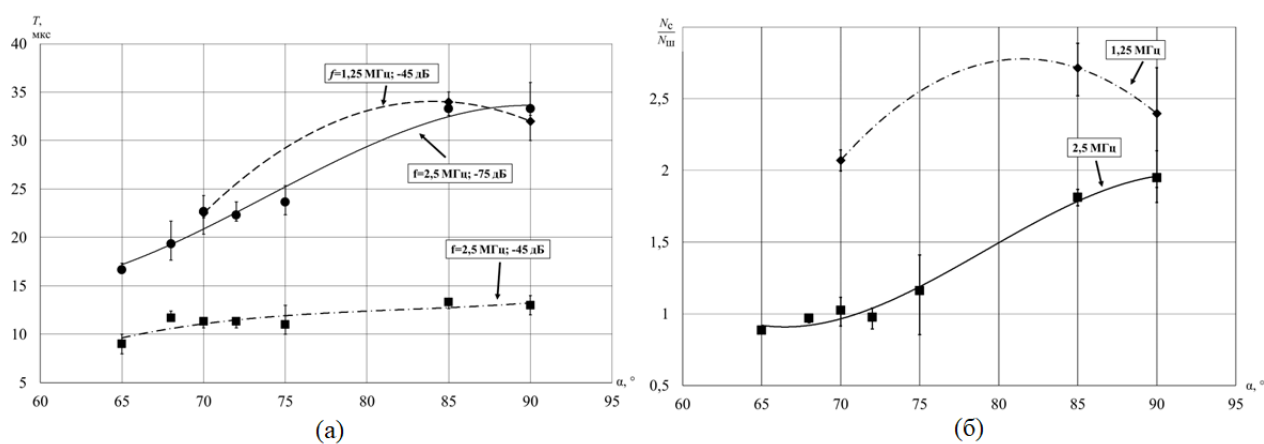


Рис. 1. Зависимость длительности ЗИ (а) и отношения сигнал/шум (б) от угла наклона боковой стенки демпфера.

При проведении исследований были достигнуты следующие результаты: предложен критерий оценки эффективности демпфера, разработана и подтверждена экспериментально расчетная модель демпфера, исследовано влияние формы демпфера на сигнал, отраженный от его тыльной части, и на сигнал, излучаемый в среду. Установлен угол наклона образующей, позволяющий добиваться наилучших результатов работы демпфера.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *K. Uchino. Advanced Piezoelectric Materials. Science and Technology, 2nd ed. Woodhead Publishing, 2017. 830 p.*
2. *Milan D. Radmanovich, Dragan D. Mancic. Designing and modeling of the power ultrasonic transducers. University of Nis: Faculty of Electronics, 2004. 198 p.*
3. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / под общ. ред. И.Н. Ермолова. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.
4. *Домаркас В.И., Кажис Р.-И. Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс: Минтис, 1974. 256 с.*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОРАЗРЯДНОМ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ

© 2024 г. **Виталий Олегович Нехорошев<sup>1,2\*</sup>**, **Д. А. Дерусова<sup>1\*\*</sup>**, **В. Ю. Шпильной<sup>1\*\*\*</sup>**

<sup>1</sup> – *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, пр. Ленина, д. 30*

<sup>2</sup> – *Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055 Томск, пр. Академический, д. 2/3*

\* - *nvo@lnp.hcei.tsc.ru*; \*\* - *red@tpu.ru*; \*\*\* - *vshpilnoy@list.ru*

Недавние достижения в области неразрушающего контроля с использованием бесконтактных акустических систем показали возможность возбуждения акустических волны с помощью импульсного электрического разряда [1–5]. Протекание тока в газоразрядном канале приводит к нагреву и расширению области плазмы газового разряда и формированию в межэлектродном промежутке волны сжатия, распространяющейся в окружающей среде, что условно называют электро-термо-акустическим эффектом [1, 3]. Указанное явление может быть использовано в неразрушающем контроле для бесконтактного возбуждения акустических колебаний в объекте исследования [1, 4, 5]. В частности, в работах [4, 5] продемонстрирована возможность проведения бесконтактных неразрушающих испытаний полимерных и композиционных материалов с использованием метода сканирующей лазерной доплеровской виброметрии и электроакустического преобразователя на основе разряда в воздухе при атмосферном давлении. Однако, как сами газоразрядные явления, протекающие в электроакустическом преобразователе, так и их взаимосвязь с акустическими процессами изучены недостаточно.

В настоящем исследовании рассмотрены газоразрядные процессы, протекающие в межэлектродном промежутке электроакустических преобразователей при различных конструкциях их электродных систем. Упрощенная схема лабораторной установки приведена на рис. 1.

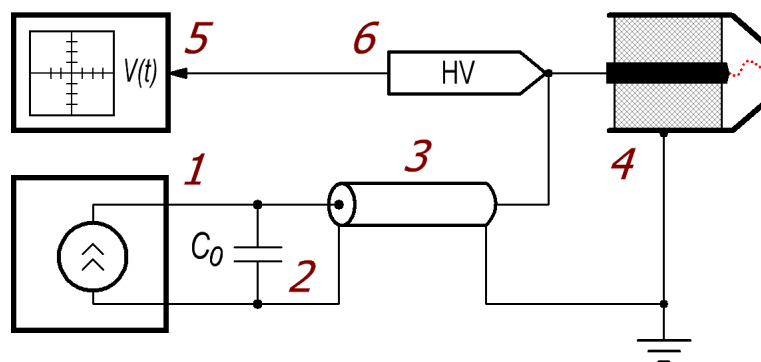


Рис. 1. Упрощенная схема лабораторной установки. Обозначения: 1 – генератор импульсов тока, 2 – ёмкостной накопитель, 3 – коаксиальный кабель, 4 – газоразрядный электроакустический преобразователь, 5 – осциллограф, 6 – высоковольтный пробник.

В рассматриваемой системе от генератора импульсов 1 заряжается накопитель 2, пока не произойдет пробой газоразрядного промежутка преобразователя 4. Затем накопитель 2 разряжается через кабель 3 и газоразрядный канал в преобразователе 4. Напряжение на межэлектродном промежутке преобразователя 4 регистрируется с помощью осциллографа 5 и высоковольтного пробника 6. Анализ осциллограмм напряжения горения разряда в электроакустическом преобразователе позволяет определить напряжение, необходимое для пробоя межэлектродного промежутка, оценить амплитуду тока разряда и характерные времена газоразрядных процессов.

На основе данных, полученных в ходе интерпретации результатов исследования, дана характеристика электроакустического преобразователя как газоразрядной нагрузки. Показано, что для различных электродных систем пробивное напряжение находится в диапазоне от 10 кВ до 16 кВ, при этом ток в контуре достигает 600 А для межэлектродных зазоров величиной (5-6) мм и 800 А для величины зазора 12 мм, что соответствует искровому разряду. Характерное время затухания колебаний тока искрового разряда не превышает 5 мкс, после чего может происходить переход из искры в дугу.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания «Наука», проект № FSWW-2023-0019, в работе применяли оборудование ЦКП НОИЦ «Наноматериалы и нанотехнологии» ТПУ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Ayrault C., Bequin P., Baudin S.* Characteristics of spark discharge as an adjustable acoustic source for scale model measurement // Proceedings of the acoustics 2012 Nantes conf. P. 3555—3559 (2012).
2. *Migachev S.A., Kurkin M.I., Smorofinskii Y.G.* Noncontact excitation of sound in metals by a video pulse of electric field // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2016. V. 52, Iss. 11. P. 653—6561.
3. *Daschewski M., Kreutzbruck M., Prager J., Dohse E., Gaal M. und Harrer A.* Resonanzfreie Messung und Anregung von Ultraschall // Technisches Messen. 2015. V. 82. Iss. 3. P. 156—66.
4. *Derusova D.A., Nekhoroshev V.O., Shpil'noi V.Y., Vavilov V.P.* Developing Novel Gas Discharge Emitters of Acoustic Waves in Air for Nondestructive Testing of Materials // Sensors. V. 22, Iss. 23. 2022. P. 14. Article number 99056.
5. *Derusova D.A., Vavilov V.P., Nekhoroshev V.O., Shpil'noi V.Y.* Characterizing air-coupled gas discharge acoustic transducers by using scanning laser Doppler refracto-vibrometry // Optics and lasers in engineering. V. 175. 2024. Article number 108043.

## КОНТРОЛЬ УГЛЕРОДНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В ОТХОДАХ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КЛАСТЕРА

© 2024 г. Вадим Владимирович Мирошников<sup>1\*</sup>, Н. В. Гречишкина<sup>1\*\*</sup>,  
А. А. Неделько<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»,  
291034 Луганск, кв. Молодежный, д. 20А

\* - [prorectormvv@mail.ru](mailto:prorectormvv@mail.ru); \*\* - [natalisha.grech@mail.ru](mailto:natalisha.grech@mail.ru); \*\*\* - [aleksandernedelko@ya.ru](mailto:aleksandernedelko@ya.ru)

В процессе разработки технологии рециклинга углеродосодержащих отходов топливно-энергетического кластера с получением экологически безопасных материалов и продуктов для «зеленого» строительства необходимо осуществлять постоянный контроль углеродной составляющей. Количество остаточного углерода определяет режим технологического процесса рециклинга и, соответственно, качество получаемого строительного материала. Изотопные и рентгеновский методы контроля имеют ряд ограничений для непрерывного контроля углеродосодержащего материала в технологическом потоке. Поэтому перспективным методом контроля является электромагнитный метод, учитывая проводимость углеродной компоненты.

Расчет переменного магнитного поля базируется на системе уравнений Гельмгольца для комплексных векторов напряженности магнитного и электрического поля [1]. При численном расчете параметров зондирующего электромагнитного поля введем один векторный и один скалярный источник. Примем  $\vec{i} = n \cdot \vec{H}$  – вектор плотности простого слоя электрического тока и  $\sigma = n \cdot \vec{H}$  – плотность простого слоя магнитных зарядов. Таким образом уравнения Гельмгольца преобразуются в систему сингулярных уравнений 2-го рода:

$$\frac{\vec{i}(Q)}{2} + \vec{n} \cdot \text{rot} \oint_S \vec{i}(P) \dot{g}_H dS_P + \vec{n} \cdot \text{grad} \oint_S \frac{\dot{\sigma}(P)}{4\pi r_{QP}} dS_P = \vec{n} \cdot \vec{H}_B(Q),$$

$$\frac{\vec{\sigma}(Q)}{2} + \mu_r \vec{n} \cdot \text{rot} \oint_S \vec{i}(P) \dot{g}_H dS_P + \vec{n} \cdot \text{grad} \oint_S \frac{\dot{\sigma}(P)}{4\pi r_{QP}} dS_P = \vec{n} \cdot \vec{H}_B(Q),$$

$\dot{g}_H = \frac{e^{-jkr_{QP}}}{4\pi r_{QP}}$  – фундаментальная функция Грина, определяющая поле точечного источника в проводящей среде.

Данная система уравнений имеет единственное решение [2]:

$$\vec{H}_B(Q) = -\frac{1}{4\pi} \text{grad} \oint_S \frac{\dot{\sigma}(P)}{r_{QP}} dS_P + \vec{H}_B,$$

определяющее напряженность поля вне проводящего объекта, содержащего углеродную компоненту.

Для измерения переменного магнитного поля  $H_0 = H_0 \sin \omega t$  на поверхности контролируемого материала применяем двухстержневые феррозонды. Расчет феррозонда ведем



при следующих допущениях: не учитываются вихревые токи в тонких сердечниках из аморфного железа; источник тока питает обмотку возбуждения; межвитковые емкости не учитываются.

Используя арктангенсную [3] аппроксимацию петли гистерезиса сердечника и выбирая оптимальное значение напряженности возбуждения  $H_m = \sqrt{2}H_S$  [4], дифференциальная магнитная проницаемость сердечников будет равна:

$$\mu_d(H) = \frac{\mu_m}{1 + 5\sin^2(\omega t)}$$

Выходное напряжение феррозонда при измерении переменного магнитного поля:

$$U_2(t) = W_2 \cdot S \cdot \mu_0 \mu_m H_{0m} \frac{d}{dt} \cdot \frac{\sin(\omega_0 t)}{1 + 5\sin^2(\omega_0 t)},$$

а функция преобразования

$$K(\omega) = \frac{U_{2m}}{H_{0m}} = W_2 \cdot S \cdot \mu_m n \times \\ \times \left( \frac{1,25(2\omega + \omega_0) \sin(2\omega + \omega_0)t_m}{(1 + 5\sin^2(\omega_0 t_m))^2} + \frac{1,25(2\omega + \omega_0) \sin(2\omega + \omega_0)t_m - 3,5\omega_0 \sin(\omega_0 t_m)}{(1 + 5\sin^2(\omega_0 t_m))^2} \right),$$

определяется в момент времени  $t_m$ , когда выходное напряжение феррозонда  $U_2(t)$  принимает свое максимальное значение  $U_{2m}$ .

Данная методика расчета применяется при использовании электромагнитного сканера [5], работающего в переменном магнитном поле, а перспективность его применения заключается в том, что снижается порог чувствительности феррозонда, что позволяет определять малые концентрации углеродной компоненты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зацепин Н.Н., Корисова Л.В. Магнитная дефектоскопия. Мн. Наука и техника, 1981. 208 с.
2. Домашевский Б.Н., Рахимов В.Ф. Расчет параметров локальных намагничивающих устройств для магнитной дефектоскопии // Дефектоскопия. 1983. № 1. С. 3—6.
3. Розенблат М.А. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. М.: Наука, 1966. 642 с.
4. Афанасьев Ю.В. Феррозондовые приборы. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 186 с.
5. Мирошников В.В., Гречишкина Н.В. Электромагнитный сканер структурно неоднородных сред // Дефектоскопия. 2023. № 9. С. 61—63.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ  
МОЛОДЕЖНОЙ ШКОЛЫ

## МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В АНАЛИЗЕ ДАННЫХ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ В ВИДЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ

© 2024 г. Антон Валерьевич Шевченко<sup>1,2\*</sup>, Н. В. Крысько<sup>1,2\*\*</sup>

<sup>1</sup> – МГТУ имени Н. Э. Баумана, 105005 Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

<sup>2</sup> – ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана», 105005, Москва, ул. 2-ая Бауманская, д. 5, стр. 1

\* - [anton.shevchenko4@yandex.ru](mailto:anton.shevchenko4@yandex.ru); \*\* - [kryskonv@bmstu.ru](mailto:kryskonv@bmstu.ru)

**Цель работы.** Рассмотреть получение данных ультразвукового неразрушающего контроля (УЗК) сварных швов в виде изображений (сканов) и типы этих данных. Изучить способы автоматизированного анализа данных УЗК с использованием машинного обучения, что существенно сократит время контроля, уменьшит вероятность ошибок и позволит анализировать большие объёмы данных. Изучить нейронные сети и их архитектуры для обработки изображений. Сделать выводы о перспективности автоматизации обработки изображений с помощью нейронных сетей.

**Суть обсуждаемой проблемы.** Сварные швы, выполненные дуговой сваркой, склонны к наличию дефектов различного типа. Качество сварных швов обычно оценивается по количеству и размеру дефектов, находящихся в них [1]. Поэтому большинство сварных швов подвергаются неразрушающему контролю. Как правило, используется широкий спектр методов неразрушающего контроля, одним из основных методов является ультразвуковой. УЗК довольно прост в использовании, им можно проверить внутреннюю структуру материала с возможностью локализации дефектов внутри контролируемого изделия. В настоящее время процедура УЗК в основном выполняется механизированными и автоматизированными методами, поскольку ручной контроль не содержит задокументированных данных контроля.

Изначальные данные УЗК представляют собой А-сканы (форма представления ультразвукового сигнала на экране ультразвукового прибора, при котором ось абсцисс представляет время, а ось ординат – амплитуду (ГОСТ Р ИСО 5577-2009 [2])). Для анализа множества А-сканов одновременно данные УЗК представляют в виде изображений, которые подразделяются на: В-сканы (изображение информативных сигналов в плоскости сечения объекта контроля, перпендикулярной поверхности ввода и параллельной плоскости падения волны [2]), С-сканы (изображение информативных сигналов в плоскости сечения объекта контроля, параллельной поверхности сканирования [2]), S- сканы (секторные, данные после использования фазированных антенных решеток (ФАР)).

Анализ данных УЗК, в отличие от процедуры их сбора, проводится вручную, что негативно сказывается на достоверности результатов, особенно при наличии большого объёма

данных [3]. Чтобы преодолеть возникающие проблемы, исследователями предложены методы автоматизированного анализа данных УЗК.

В обработке данных УЗК необходимо решить следующие задачи с помощью компьютерного зрения: обнаружение объектов на сканах, определение их координат (а), классификация объектов, соответствие фрагментов сканов типам дефектов (б).

**Полученные результаты.** На практике используют разные алгоритмы машинного обучения (machine learning), включая обучение с учителем (supervised learning) и без учителя (unsupervised learning), которые могут выполнять задачи распознавания и классификации. Современные исследования направлены на развитие существующих моделей глубокого обучения (deep learning) [4], а также на разработку новых моделей, обученных на больших объёмах данных, представленных В-, С- и S-сканами ультразвукового контроля эхо-импульсным и дифракционно-временными методами.

**Выводы.** В последние годы подходы на традиционных технологиях компьютерного зрения, а также на основе алгоритмов машинного/глубокого обучения стали одним из перспективных направлений в разработке решений для автоматизированного анализа данных УЗК. Несмотря на перспективность и удобство глубокого обучения могут возникать специфические проблемы, ограничивающие производительность методов. Кроме того, нет единого подхода к анализу данных. Существуют методы, которые могут обрабатывать только В-сканы [5], С-сканы или S-сканы, есть методы, в которых одновременно рассматриваются сразу несколько типов сканов, однако до сих пор не выявлено, какой из методов является оптимальным по скорости и качеству. Описаны основные решения и архитектуры для достижения вышеупомянутых задач, сделаны выводы о дальнейших исследованиях в обработке данных УЗК.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алёшин Н.П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений: учебное пособие. 3-е изд., испр. Москва: Инновационное машиностроение, 2021. 576 с.
2. ГОСТ Р ИСО 5577-2009. Контроль неразрушающий. Ультразвуковой контроль. Словарь: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2011-01-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Москва: Стандартинформ, 2011. 31 с.
3. Medak D., Posilovic L., Subašić M., Budimir M., Lončarić S. Automated defect detection from ultrasonic images using deep learning // IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control. 2021. V. 68. P. 3126—3134.
4. Medak D., Posilovic L., Subašić M., Budimir M., Lončarić S. DefectDet: A deep learning architecture for detection of defects with extreme aspect ratios in ultrasonic images // Neurocomputing. 2022. V. 473. P. 107—115.
5. Medak D., Posilovic L., Subašić M., Budimir M., Lončarić S. Generative adversarial network with object detector discriminator for enhanced defect detection on ultrasonic B-scans // Neurocomputing. 2021. V. 459. P. 361—369.

## ТЕПЛОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ЛИНЕЙНОМ СКАНИРОВАНИИ

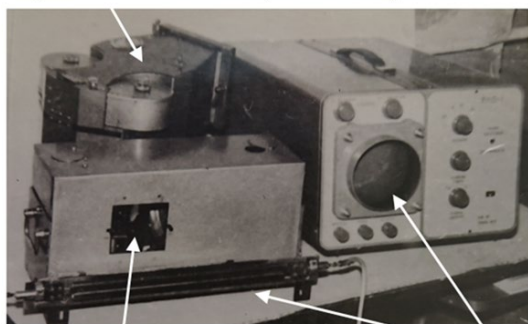
© 2024 г. Арсений Олегович Чулков<sup>1\*</sup>, В. П. Вавилов<sup>1\*\*</sup>, Д. Ю. Кладов<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск,  
пр. Ленина, д. 30

\* - [chulkovao@tpu.ru](mailto:chulkovao@tpu.ru); \*\* - [vavilov@tpu.ru](mailto:vavilov@tpu.ru); \*\*\* - [dyk10@tpu.ru](mailto:dyk10@tpu.ru)

Исследования последних десятилетий в области активного теплового контроля (ТК) были в основном связаны с процедурой испытаний от зоны к зоне, что требует мощного и равномерного нагрева сравнительно больших участков поверхности объектов контроля. В Томском политехническом университете (ТПУ) возобновлена разработка устройств ТК, использующих принцип сканирующего полосового нагрева. Подобные устройства создавали в СССР Рапопорт Д.А., Стороженко В.А., О.Н. Будадин, В.П. Вавилов, В.В. Ширяев и др. [1, 2]. На рис. 1а показан фоторегистрирующий инфракрасный (ИК) дефектоскоп ФИД-1 ТПУ, в котором нагрев осуществляли нихромовой лентой длиной 60 мм и мощностью 500 Вт. Температуру регистрировали с помощью разработанного строчно-сканирующего ИК радиометра. Схема полосового нагрева и тепловизионного сканирования показана на рис. 1б. Тепловизор непрерывно записывает последовательность ИК термограмм при соблюдении жестких условий к скоростям нагрева и записи термоизображений. Затем из каждой термограммы выбирают определенные строки и синтезируют развертку контролируемой поверхности при выбранной задержке времени между моментами нагрева и регистрации температуры.

Устройство записи на фото пленку

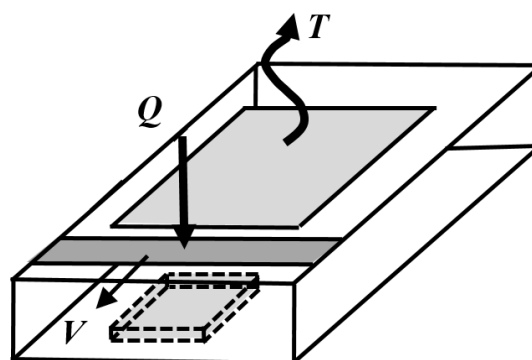


Строчно-сканирующий ИК радиометр      Полосовой нагреватель      Осциллограф

а)

б)

Рис. 1. Фоторегистрирующий ИК дефектоскоп ФИД-1 (а)  
и схема линейного сканирования (б).



Принцип линейного сканирования реализован ТПУ в двух устройствах ТК, показанных на рис. 2. Самоходный тепловой дефектоскоп (рис. 2а) предназначен для непрерывного контроля плоских изделий большой площади, таких как композитное крыло самолета МС-21. Результатом

контроля является развертка температурного поля изделия, которую можно синтезировать при различных временных задержках относительно момента нагрева, что позволяет оптимизировать выявление дефектов на различных глубинах в композите. На рис. 2б показано устройство ТК крупногабаритных цилиндрических изделий, в частности, труб с теплозащитным покрытием. Примеры результатов ТК, полученных с помощью обоих тепловых дефектоскопов, приведены на рис. 3.



Рис. 2. Самоходные тепловые дефектоскопы для контроля плоских (а) и цилиндрических (б) изделий.

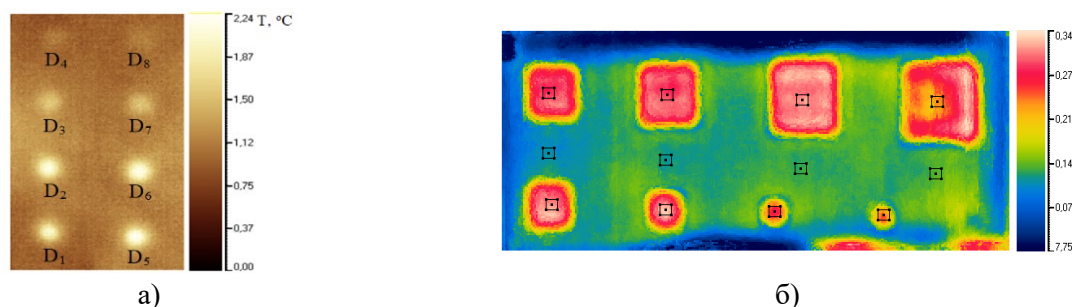


Рис. 3. Примеры результатов ТК с использованием тепловых дефектоскопов, показанных на рис. 2:  
 а – результат контроля плоскодонных отверстий в стеклопластиковой пластине;  
 б – результат контроля расслоений композита, наклеенного на металлическую подложку.

Вышеописанные исследования были поддержаны грантом FSWW-2023-0004 Министерства науки и высшего образования РФ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Стороженко В.А., Вавилов В.П., Волчек А.Д.* Неразрушающий контроль качества промышленной продукции активным тепловым методом. Киев: Техника, 1988. 128 с.
2. *Вавилов В.П., Ширяев В.В., Танасейчук С.Ю.* Комплексный подход к проектированию системы теплового контроля паяных соединений // Дефектоскопия. 1978. № 10. С. 63—67.

## ВЛИЯНИЕ ШИРИНЫ РАССЛОЕНИЙ В СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЯХ НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ПРИ АКТИВНОЙ ТЕРМОГРАФИИ

© 2024 г. Юрий Андреевич Захаров<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> – ФГБОУ ВО «ТГТУ», 392000 Тамбов, ул. Советская, д. 106/5

<sup>2</sup> – ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина»,  
392000 Тамбов, ул. Интернациональная, д. 33

\* - sci.zah@ya.ru

Целью работы является создание методов неразрушающего термографического контроля полимерных композиционных материалов, основанного на математическом и алгоритмическом аппарате, позволяющим достичь частичной автоматизации идентификации подповерхностных дефектов.

В последние годы наблюдается возрастание применения полимерных композиционных материалов в различных областях техники [1]. Это обусловлено рядом достоинств таких материалов: достаточно большими показателями прочности, жёсткости и теплоизоляционных свойств при малой массе. В современных самолётах доля полимерных композитов достигла 50 % массы и продолжает расти [2]. Однако применение таких материалов осложнено возможностью появления в них дефектов, которые могут приводить как к снижению эксплуатационных характеристик изделий из них, так и вовсе приводить к разрушению материала и аварийным ситуациям [3].

Для идентификации дефектов в таких материалах, например, расслоений, применяются различные методы неразрушающего контроля, одним из которых является активная термография [4]. Термографический контроль имеет ряд достоинств: производительность, наглядность, чувствительность к небольшим расслоениям и прочие [5].

Ранее предложено два способа обнаружения дефектов типа «расслоение»: первый основан на свёртке двухмерной термограммы поверхности материала путём вычисления среднеквадратичного отклонения температуры в скользящем окне, сравнимом по размерам с размером соты, второй основан на вычислении средней температуры в скользящем окне размером с соту. Для обоих способов дана оценка надёжности обнаружения дефекта.

В настоящей работе исследована зависимость видимости дефекта при применении описанных методов от толщины воздушного зазора при отслоении сотового заполнителя. Экспериментальные исследования проводились на модельном образце сотовой конструкции. Применена разработанная экспериментальная установка с линейным источником нагрева образца излучением и тепловизором. Обработка записи тепловизора проводилась при помощи программного обеспечения собственной разработки. Видимость дефектов оценивалось по критерию Байеса.

В результате показано, что доля ошибочно определяемой области отрицательно коррелирует с толщиной воздушного зазора в дефекте. Для выбранных параметров критерий, основанный на определении дефектов по избыточной температуре, оказался более надёжным. Экспериментальные данные (минимальная доля ошибки при определении дефекта) показаны на рис. 1.

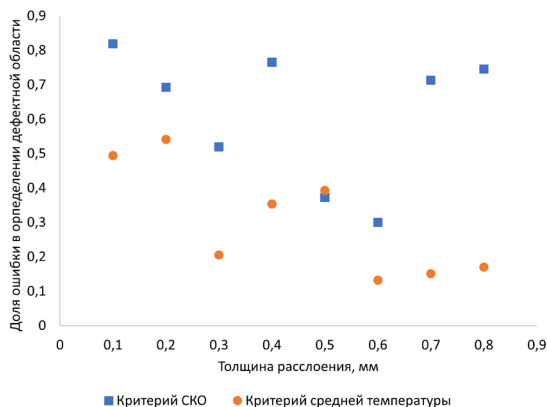


Рис. 1. Доля ошибки в определении дефектной области при применении двух способов обнаружения дефектов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-19-00602 (<https://rscf.ru/project/23-19-45049/>) с использованием оборудования ЦКП ФГБОУ ВО «ТГУ имени Г. Р. Державина».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Корнейчук А.И., Волков В.С., Шуль Г.С., Денисова Е.В., Кулагина И.В., Чугунов С.А. Стеклопластиковые сотовые наполнители: достижения и пути развития // Материалы V Всероссийской научно-технической конференции «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения», Москва, 19 ноября, 2021. М.: НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ, 2021. С. 21—29.
2. Кабалов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки - основа инновации // Крылья родины. 2016. № 5.
3. Славин А.В., Косарина Е.И., Генералов А.С., Диков И.А. Перспективы развития современных методов неразрушающего контроля и технической диагностики во ФГУП «ВИАМ» // Материалы X Всероссийской конференции «ТестМат. Основные тенденции, направления и перспективы развития методов неразрушающего контроля в аэрокосмической отрасли», Москва, 9 февраля, 2018. М.: ВИАМ, 2018. С. 260—287.
4. Gebrehiwet L., Chimido, A., Melaku W., Tesfaye E. A Review of Common Aerospace Composite Defects Detection Methodologies // International Journal of Research Publication and Reviews. 2023. V. 4, No. 8. P. 1829—1846.
5. Usamentiaga R., Venegas, P., Guerediaga, J., Vega, L., Molleda, J., Bulnes, F.G. Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing // Sensors (Switzerland). 2014. V. 14. No. 7.



## ОЦЕНКА ВРЕМЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СТАЛИ ПО ПАРАМЕТРАМ ГАРМОНИЧЕСКОГО СПЕКТРА КРИВОЙ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ

© 2024 г. **Роман Александрович Соколов<sup>1\*</sup>, К. Р. Муратов<sup>1\*\*</sup>**

<sup>1</sup> – Тюменский индустриальный университет, 625000 Тюмень, ул. Володарского, д. 38  
\* - [falcon.rs@mail.ru](mailto:falcon.rs@mail.ru); \*\* - [muratovkr@tyuiu.ru](mailto:muratovkr@tyuiu.ru)

Одним из критических свойств стали, по которому судят о надежности и сроке эксплуатации изделия, является временное сопротивление [1, 2]. Определение величины  $\sigma_b$  производят стандартным образом в процессе разрушения образца, изготовленного из стали и имеющего определенную форму и геометрические размеры. Методика проведения испытаний требует соблюдение определенных условий и технологических операций для получения искомой величины  $\sigma_b$  [2].

Помимо разрушающих методов определения  $\sigma_b$  существуют неразрушающие методы, например, основанные на регистрации ультразвуковых волн, проходящих через объект контроля [3].

Известны методы магнитного структурного анализа [4, 5], основанные на регистрации и интерпретации магнитных характеристик вещества. В настоящей работе представлены результаты применения подобного подхода для определения величины временного сопротивления материала. В качестве анализируемого параметра использовался гармонический спектр петли магнитного гистерезиса, полученный согласно методике, изложенной в работе [6].

Анализируемые данные были получены на образцах, изготовленных из сталей 15ХСНД, Ст3, 09Г2С после термической обработки.

Одноосное растяжение образцов проводилось на разрывной машине ИР 5047-50. Скорость перемещения захватов при испытаниях составляла 15 мм/мин. Регистрация петель магнитного гистерезиса производилась при помощи магнитного структуроскопа АПС DIUS 1.15, реализующего измерения в замкнутой магнитной цепи.

На основе метода разделения диагноза в пространстве признаков был найден комплексный параметр  $P$ , величина которого имеет удовлетворительную корреляцию с  $\sigma_b$  исследуемых материалов (рис. 1).

Данные, приведенные на рис. 1, показывают наличие удовлетворительной корреляции между величиной  $\sigma_b$  и  $P_1$ . Достоверность описания наблюдаемой зависимости составляет  $R^2 = 0,92$  с относительной ошибкой определения временного сопротивления равной  $\pm 9,6\%$ .

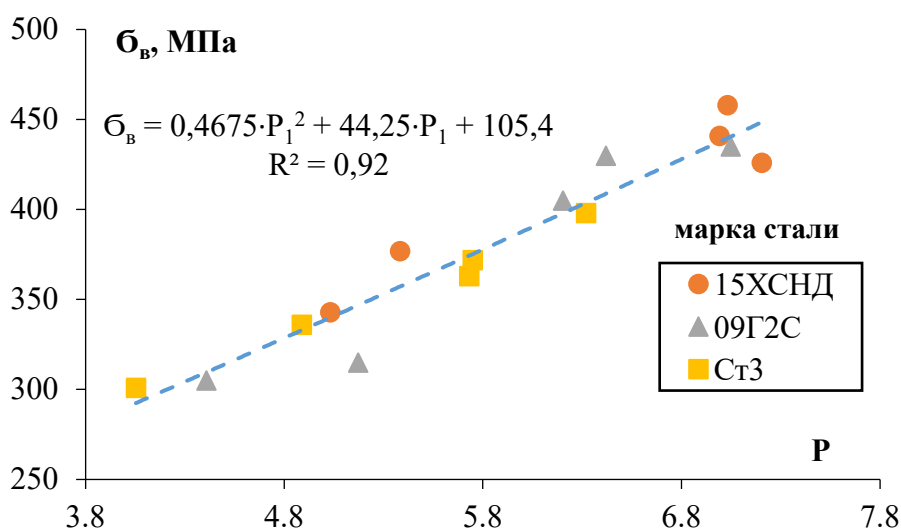


Рис. 1. Изменение величины  $\sigma_{\text{в}}$  при изменении величины  $P$ , полученной по гармоническому спектру петли магнитного гистерезиса.

Полученные результаты отражают возможность практического использования комплексного параметра  $P$ , полученного по спектральным составляющим петли магнитного гистерезиса для оценки величины  $\sigma_{\text{в}}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Агамиров, Л.В. Машиностроение. Энциклопедия. В 40 т. Разд. 2. Материалы в машиностроении. Т. 2-1. Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов. М.: Машиностроение, 2010. 851 с.
2. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение: Введ. 1986-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1990. 52 с.
3. Полетика И.М., Егорова Н.М., Куликова О.А., Зуев Л.Б. Об ультразвуковом контроле неоднородности механических свойств горячекатаной стали // Журнал технической физики. 2001. Т. 71. № 3. С. 37—40.
4. Пономарев Ю.Ф. Закономерности гармонических составляющих намагниченности циклически перемагничиваемых ферромагнитных сердечников и возможности их использования. I. Критерии физического подобия // Дефектоскопия. 1983. № 9. С. 52—62.
5. Новиков В.Ф., Нерадовский Д.Ф., Соколов Р.А. Использование квазистатических петель магнитного гистерезиса для контроля структуры стали // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2016. Т. 18. № 2. С. 38—49.
6. Соколов Р.А., Муратов К.Р., Новиков В.Ф. Применение параметров спектральных характеристик кривой перемагничивания для определения твердости ферромагнитного материала // Дефектоскопия. 2023. № 6. С. 70—72.

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО КОНТРОЛЯ ПОКРЫТИЙ ТРУБ В ПОТОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

© 2024 г. Денис Игоревич Антонов<sup>1\*</sup>, В. А. Сясько<sup>2\*\*</sup>, А. С. Мусихин<sup>2\*\*\*</sup>,  
М. С. Степанова<sup>3\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – ВНИИМ им. Менделеева, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 19

<sup>2</sup> – ООО «КОНСТАНТА», Санкт-Петербург, Огородный пер., д. 21, литер А

<sup>3</sup> – Санкт-Петербургский Горный университет, Санкт-Петербург, 22-я линия В.О., д. 1

\* - antonovden99@mail.ru; \*\* - 9334343@gmail.com; \*\*\* - musihinaleksei@mail.ru;

\*\*\*\* - stepanovamariya11.02.01@gmail.com

В настоящее время автоматизированный контроль сплошности покрытий металлических труб с учетом обеспечения требований по электробезопасности регламентируется проводить импульсным электроискровым методом неразрушающего контроля (НК). Однако при его реализации в поточном трубном производстве присутствует ряд факторов, оказывающих существенное влияние на производительность и достоверность контроля. В частности, электрическая емкость системы «электрод – диэлектрическое покрытие – металлическое основание» обуславливает дополнительные требования по обеспечению выходной мощности источника испытательного напряжения  $U_n$  при необходимости согласовывания скорости перемещения трубы с частотой следования импульсов испытательного напряжения.

Разработана конечно элементная модель системы «источник высокого импульсного напряжения – электрод – диэлектрическое покрытие – металлическое основание», с использованием которой исследовано влияние параметров объекта контроля – металлической трубы диаметром  $D$  от 1 до 1,5 м с защитным диэлектрическим покрытием толщиной  $d_n$  от 2 до 6 мм – на достоверность НК и стабильность высокого напряжения и частоту следования импульсов при варьируемых  $D$  и  $d_n$ , а также диэлектрической проницаемости покрытия и нестабильности контакта электрода с покрытием.

Для обеспечения стабильного поддержания амплитуды импульса  $U_n$ , а также обеспечения требуемой мощности выходного сигнала было проведено моделирование электрической эквивалентной схемы указанной выше электронной модели в САПР LTspice и предложено программно-аппаратное решение генератора высокого напряжения (рис. 1), позволяющее обеспечить требуемое стандартами  $U_n$  до 35 кВ на электродах большой площади при нагрузочной емкости до 800 пФ.

Для формирования импульса  $U_n$  повышающий преобразователь формирует постоянное напряжение на емкости  $C_0$  равное  $k \cdot U_0$ , где  $k$  – коэффициент преобразования. При разряде  $C_0$  через ключ  $K_2$  и первичную обмотку трансформатора  $T$ , на вторичной обмотке трансформатора формируется импульс  $U_n$ , амплитуда которого зависит от параметров  $T$  и эквивалентных нагрузочной емкости  $C_n$  и сопротивления  $R_n$  объекта контроля. Регулировка напряжения на

электроде при изменении параметров  $C_n$ ,  $R_n$  в процессе контроля осуществляется с помощью программного PID регулятора, формирующего корректирующее воздействие на повышающий преобразователь. Внешний измеритель напряжения осуществляет контроль за стабильностью  $U_n$  в допустимом методикой диапазоне. На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости  $U_n(d_n)$ , снятые при разных  $C_n$  (где  $d_n$  – толщина покрытия) для генератора, схема которого изображена на рис. 1.

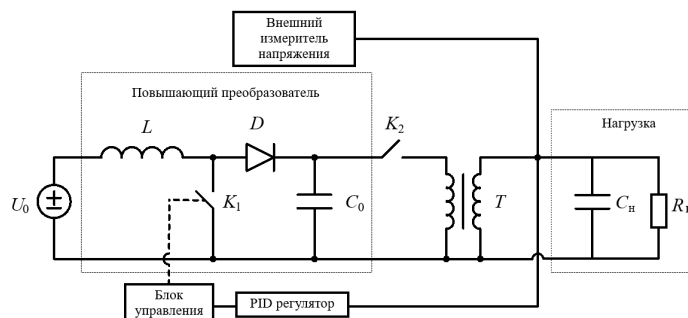


Рис. 1. Структурная схема генератора  $U_n$ .  $L$  – индуктивность,  $D$  – диод,  $K_1, K_2$  – ключи,  $C_0$  – накопительный конденсатор,  $T$  – повышающий трансформатор,  $C_n$  – эквивалентная емкость системы электрод - покрытие - основание,  $R_n$  – активное эквивалентное сопротивление покрытия.

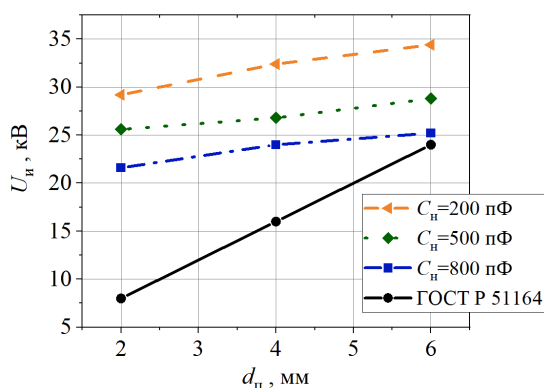


Рис. 2. Зависимость напряжения на электроде от толщины покрытия для отличающихся емкостей нагрузки ( $C_n$ ).

Из рис. 2. видно, что использование предложенных аппаратных и программных решений позволяет обеспечить нестабильность амплитуды  $U_n$  не более 5 % при  $C_n= 200\dots800$  пФ и обеспечить выявление сквозных и несквозных дефектов покрытий при скорости движения объекта контроля до 0,3 м/с вдоль традиционно применяемых кольцевых электродов.

Полученные результаты предлагается использовать при проектировании систем автоматизированного электроискрового контроля сплошности покрытий труб магистральных и распределительных трубопроводов в поточном производстве.

## МАГНИТОАКУСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЦЕНКИ АНИЗОТРОПИИ СПЛАВА НИКЕЛЬ-ЖЕЛЕЗО

© 2024 г. Вадим Николаевич Перов<sup>1\*</sup>, Е. Д. Сербин<sup>1\*\*</sup>, В. Н. Костин<sup>1</sup>,  
Л. В. Михайлов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – *Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, 620108 Екатеринбург,  
ул. Софьи Ковалевской, д. 18*

\* - *perovadim22@gmail.com*; \*\* - *serbin@imp.uran.ru*

Поиск и определение новых структурно-чувствительных параметров является основной задачей структуроскопии ферромагнетиков. Изменение параметров ферромагнетика при изменении направления его намагничивания – магнитная анизотропия является важным параметром, который необходим для неразрушающего контроля. В работе [1] демонстрируется возможность применения магнитного метода на основе эффекта Баркгаузена для контроля механической анизотропии физико-механических свойств ферромагнитных материалов. В работе [2] в качестве параметров оценки анизотропии выступают такие структурно-чувствительные характеристики, как коэрцитивная сила и остаточная намагниченность, в [3] – относительная магнитная проницаемость.

Задачей данной работы является экспериментальное исследование и анализ влияния отжига на анизотропию магнитных, магнитоакустических и акустических характеристик железоникелевого диска, а также обнаружение наиболее структурно-чувствительного параметра.

В настоящей работе исследован комплекс магнитных, магнитоакустических и акустических свойств железоникелевого диска, который был получен из медали путем шлифования и впоследствии подвергнут отжигу при температурах от 400, 550 и 700 °С. Образец для исследований имеет сложное напряженно-деформированное состояние. Измерения магнитных параметров производились локально с помощью аппаратно-программной системы DIUS–1.21M. Для оценки анизотропии магнитных характеристик образец был размечен с шагом в 15°.

На рис. 1 приведены зависимости параметров железоникелевого диска от угла поворота электромагнита, а также фотография микроструктуры, соответствующие температуре отжига 400 °С. Показано, что свойства исследуемого образца, такие как, например, коэрцитивная сила ( $H_c$ ), максимальная дифференциальная магнитная проницаемость ( $\mu_{dmax}$ ), динамическая магнитострикционная чувствительность ( $d\lambda/dH$ ) изменяются с ростом температуры в диапазоне от 8 до 13 %, от 15 до 35 %, от 10 до 18 %, соответственно.

Стоит отметить, что изменения этих параметров с углом поворота электромагнита, приведенные на радиальных диаграммах на рис. 1, согласуются с теоретическими данными.

На фотографии микроструктуры (рис. 1(а)) действительно наблюдается упорядоченная вытянутость зерен вдоль одного направления – текстура прокатки.

Коэрцитивная сила (рис. 1 (б)) ведет себя немного иначе, нежели остальные характеристики,

а именно, наблюдается двухосная анизотропия, что может быть вызвано сложным напряженно-деформированным состоянием исследуемого образца.

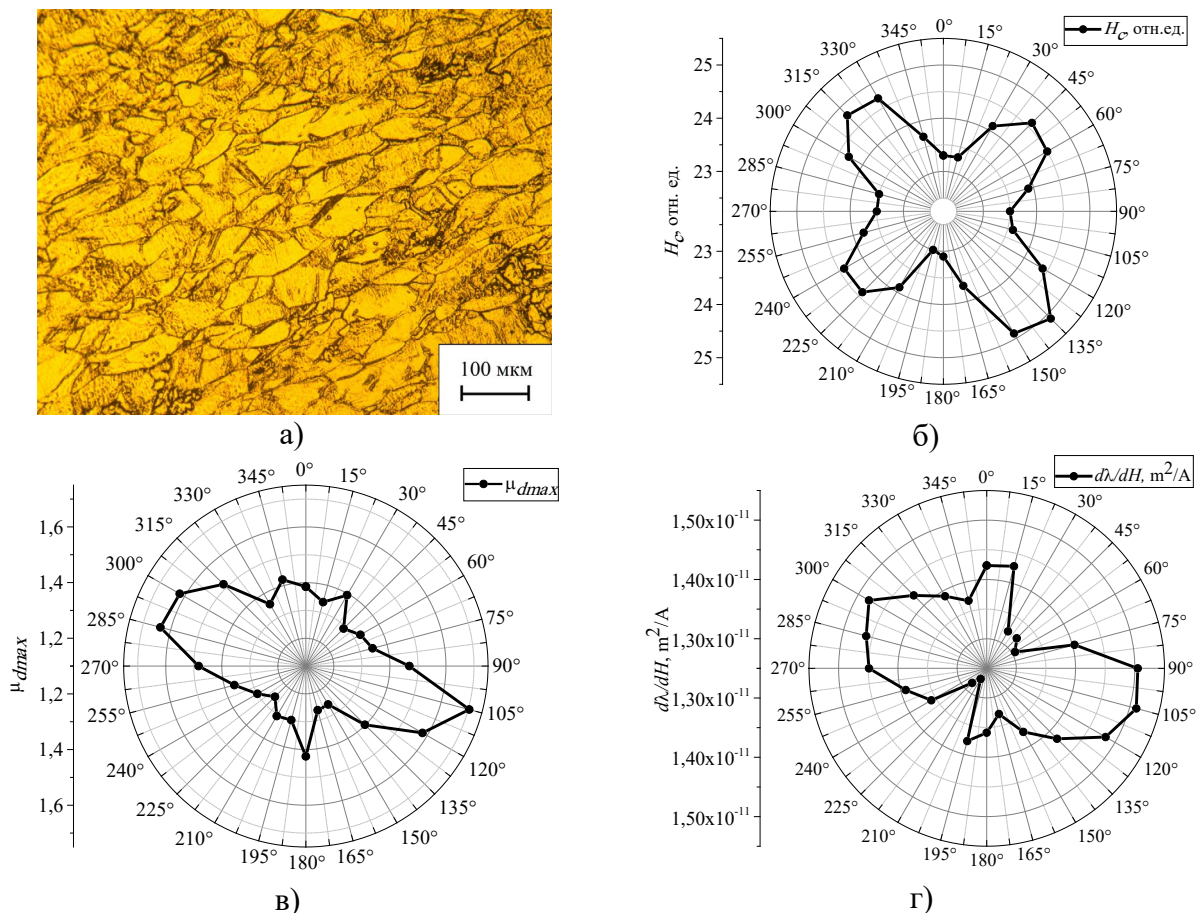


Рис. 1. Фотография микроструктуры (а), зависимости коэрцитивной силы (б), максимальной дифференциальной магнитной проницаемости (в) и динамической магнитострикционной чувствительности (г) от угла поворота электромагнита, соответствующие температуре отжига 400 °С.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика» №122021000030-1).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бусько В.Н., Осипов. А.А. Применение магнитошумового метода для контроля анизотропии ферромагнитных материалов // Приборы и методы измерений. 2019. № 3. С. 281—292.
2. Кулагин В.Н., Осипов. А.А., Пиунов В.Д. Анизотропия листового проката низкоуглеродистых сталей и оценка ее неоднородности // Приборостроение-2022: материалы 15-й Международной научно-технической конференции. 2022. С. 343—344.
3. Ригмант М.Б., Кочнев А.В., Казанцева Н.В., Корх Ю.В., Корх М.К. Выявление магнитной анизотропии в аустенитной стали 09Х17Н5Ю после деформации прокаткой // Сборник статей 8-й Международной научно-технической конференции «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов». 2022. С. 224—229.

# МОНИТОРИНГ ИЗМЕНЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ НА ИЗГИБ ОБРАЗЦОВ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ

© 2024 г. Александр Викторович Кочнев<sup>1\*</sup>, М. Б. Ригмант<sup>1</sup>, М. К. Корх<sup>1</sup>,  
Н. В. Гордеев<sup>1,2</sup>, А. М. Матосян<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> – ИФМ УрО РАН, 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 18

<sup>2</sup> – ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 620002  
Екатеринбург, ул. Мира, д. 19

\* - [kochnevav@imp.uran.ru](mailto:kochnevav@imp.uran.ru)

Испытания на усталостную прочность достаточно важны для аустенитных сталей [1], так как их свойства могут изменяться во время эксплуатации. В ходе деформации возможно образование фазы мартенсита деформации, что можно обнаружить по изменению магнитных свойств.

Целью работы было исследование изменения относительной магнитной проницаемости образцов из аустенитной хромоникелевой стали во время и после циклических испытаний на изгиб.

Испытания проводились на специальной лабораторной установке для циклических испытаний на изгиб. Образцы из аустенитной хромоникелевой стали были вырезаны на электроэрозионном станке. Толщина образцов составляла 1,9-2,1 мм. Рабочая длина (длина колеблющегося участка) – 79 мм. Общая длина образца составляла 100 мм. Образец закрепляется по типу жёсткой заделки, после чего к свободному концу прикладывается усилие, приводящее к изгибу образца. Прилагаемая нагрузка варьировалась путём изменения амплитуды отклонения образца от нейтрального положения. Для измерения относительной магнитной проницаемости вблизи от места крепления образца устанавливался первичный преобразователь прибора «ФерроКОМПАС». Сигнал с датчика Холла в виде напряжения поступал на прибор и далее через АЦП L-Card E14-140 на ПК, где записывался лог-файл программой Powergraph.

Для образцов 3-5 была снята зависимость относительной магнитной проницаемости в процессе циклирования. Пример для одного из образцов представлен на рис. 1. Ожидаемо, в конце испытания происходит резкое возрастание относительной магнитной проницаемости, связанное с образованием мартенсита деформации.

Согласно эпюре напряжений максимальную нагрузку при типе крепления «жёсткая заделка» образец испытывает в месте закрепления, что хорошо согласуется с результатами эксперимента, так как разрушение образца происходит именно в данной области. Кроме того, в месте излома образуется наибольшее количество мартенсита, что отражено в табл. 1.

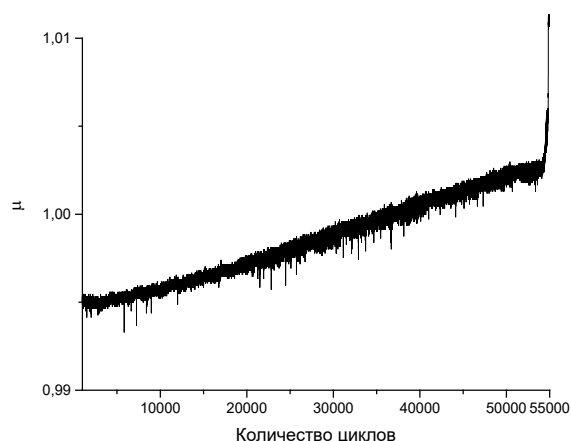


Рис. 1. Зависимость относительной магнитной проницаемости от количества циклов.

Необходимо отметить, что значения  $\mu$  у излома выше, чем на графиках, что связано с пространственными ограничениями закрепления первичного преобразователя (он закреплён на участке 6,5-6,9 мм). Кроме того, с уменьшением нагрузки различие в значениях магнитной проницаемости падает (т.е. образуется меньшее количество мартенсита деформации).

Таблица 1

**Изменение относительной магнитной проницаемости по длине образца № 1**

Расстояние от свободного края, см	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	7,9 (излом)
$\mu$	1,006	1,006	1,007	1,007	1,008	1,011	1,031	1,098	1,106

Были проведены исследования по мониторингу относительной магнитной проницаемости ( $\mu$ ) образцов из аустенитных хромоникелевых сталей при циклических испытаниях на изгиб. Было показано, что при разрушении образца, как и ожидалось, наблюдается резкое увеличение магнитной проницаемости, связанное с образованием мартенсита деформации. Рост  $\mu$  падает по длине образца и с уменьшением приложенной нагрузки.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № 122021000030-1).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Puchi-Cabrera E.S., Staia M.H., Tovar C., Ochoa-Pérez E.A. High cycle fatigue of 316L stainless steel // International Journal of Fatigue. 2008. V. 30. P. 2140—2146.



## УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТНОСТИ ЛИСТОВОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ ВОЛНАМИ ЛЭМБА

© 2024 г. Алексей Витальевич Васильев<sup>1\*</sup>, Д. Ю. Бирюков<sup>1</sup>, А. Ф. Зацепин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – *Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 620002 Екатеринбург, ул. Мира, д. 19*

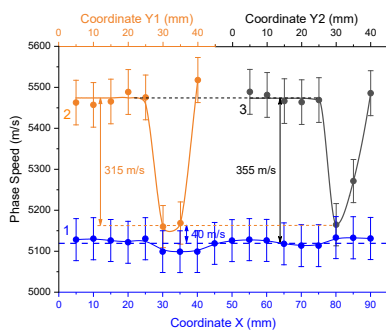
\* - *klokova.m.09@mail.ru*

Актуальность совершенствования контроля качества сварных швов в тонких пластинах электротехнической стали определяется их меньшей прочностью по сравнению с более толстыми изделиями и сложностью возбуждения бегущих волн, на анализе которых основано большинство методов акустического контроля. Для контроля объектов малой толщины наиболее подходящим оказалось использование волн Лэмба, которые могут существовать при толщине от 0,15 до 3,5 мм.

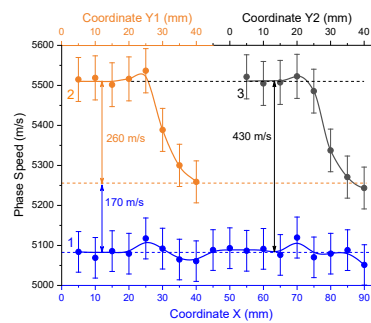
Фазовая скорость волн Лэмба зависит от скорости звука в изделии, частоты колебаний, толщины слоя, а также от наличия дефектов в материале, в котором такие волны распространяются. Таким образом, целью данной работы является отработка методики контроля стыковых швов в тонких пластинах электротехнической стали с помощью параметров волн Лэмба, таких как амплитуда и фазовая скорость. Суть методики состоит в измерении времени прохождения волн Лэмба через сварной шов для определения зависимости их фазовых скоростей от координаты положения ультразвукового преобразователя и последующего выявления дефектных областей сварного шва.

Исследования проводились на образцах с различным качеством сварных соединений толщиной 0,7 мм и размерами: 93×99 мм и 93×104 мм. Для определения угла призмы и рабочей частоты преобразователя были использованы дисперсионные зависимости волн Лэмба для электротехнической стали. Исходя из дисперсионных кривых по методике, описанной выше, были выбраны частота (1,25 МГц) и угол ввода (37°) ультразвуковых колебаний, при которых в пластине толщиной 0,7 мм возникает нулевая симметричная мода волны Лэмба. Таким образом, был выбран преобразователь П121-1.25-30.

При помощи данного преобразователя были проведены измерения на образцах и получены зависимости фазовой скорости звука (рис. 1) и амплитуды волн Лэмба (рис. 2) в различных направлениях сварного шва. На рис. 1 фазовая скорость волн Лэмба, прошедших поперёк дефектного шва, заметно снижается относительно качественного соединения, чего нельзя сказать о направлении прозвучивания вдоль шва. Это связано с анизотропией акустических свойств в области термического воздействия.

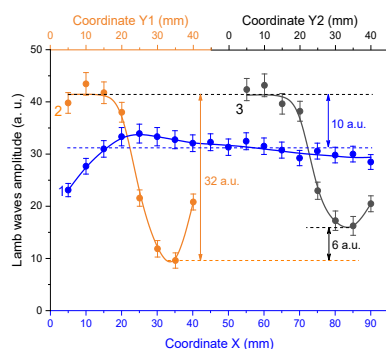


а

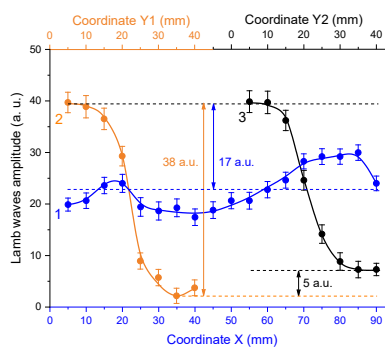


б

Рис. 1. Графики зависимости фазовой скорости волн Лэмба при прохождении поперёк и вдоль качественного (а) и дефектного (б) сварного шва.



а



б

Рис. 2. Графики зависимости амплитуды волн Лэмба при прохождении поперёк и вдоль качественного (а) и дефектного (б) сварного шва.

Профиль распределения амплитуды волн Лэмба, прошедших вдоль сварных швов (рис. 2), показывает, что как в качественном, так и в дефектном сварных швах амплитуда снижается. Области термического искажения материала вблизи дефектного шва также отличаются заниженными значениями амплитуды. Из этого можно сделать вывод, что коэффициент затухания материала в процессе вытягивания образцов не изменяется, но повышается в процессе сварки и наибольшее затухание наблюдается вблизи стыка пластин.

Таким образом, фазовая скорость и амплитуда волн Лэмба являются маркерами качества тонких сварных швов и могут быть использованы для контроля их дефектности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гуревич С.Ю., Петров Ю.В., Божко В.Ф. Генерация нормальных акустических волн (волн Лэмба) в металлах с помощью импульсов лазерного излучения // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математика. Механика. Физика. 2006. № 7. С. 86
2. Зацетин А.Ф. Акустический контроль. В 2 ч. Ч 1. Введение в физику акустического контроля. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. 88 с.
3. Ермолов И.Н., Алешин Н.П., Потапов А.И. Акустические методы контроля. Кн. 2. Изд-во Высшая школа, 1991. 283 с.
4. Вайниток И.С., Герасимов В.Г., Гурвич А.К. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник: В 2-х кн., Москва: Машиностроение, 1976. 326 с.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ДЕТЕКТОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\delta$ ДЛЯ НЕЙТРОННОЙ ДОЗИМЕТРИИ

© 2024 г. Александр Игоревич Бояринцев<sup>1\*</sup>, Р. М. Абашев<sup>1</sup>, А. Д. Петракович<sup>2</sup>,  
И. И. Мильман<sup>1</sup>, А. И. Сюрдо<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – *Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, 620108 Екатеринбург,  
ул. Софьи Ковалевской, д. 18*

<sup>2</sup> – *ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», ФТИ,  
620002 Екатеринбург, ул. Мира, д. 21*

\* - *boyarincev.alex@gmail.com*

Специалистами Института физики металлов УрО РАН и АО «Уральский электромеханический завод» разработан новый наукоемкий продукт – автоматизированная система индивидуального дозиметрического контроля КОРОС-333 с комплектом дозиметров для измерения индивидуальных эквивалентов доз (ИЭД) облучения всего тела  $\text{Hr}(10)$ , хрусталика глаза  $\text{Hr}(3)$  и кожных покровов  $\text{Hr}(0.07)$  в полях бета- и фотонных ионизирующих излучений [1]. Впервые в России в ней для считывания дозиметрической информации использован эффект оптически стимулированной люминесценции (ОСЛ) в анионодефицитном корунде ( $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\delta$ ). Система успешно прошла государственные испытания, на которых было подтверждено ее превосходство по совокупности метрологических и технико-эксплуатационных параметров над зарубежными термолюминесцентными и ОСЛ-аналогами. Она внесена в госреестр средств измерений (№ 87141-22). Однако в системе пока отсутствуют дозиметры для измерения ИЭД в смешанных гамма-нейтронных полях. Поэтому одной из первых задач при создании нейтронного ОСЛ-дозиметра был выбор материала нейтронного конвертора, который бы наиболее эффективно преобразовывал энергию нейтронов в энергию возбуждения детекторного материала на основе  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\delta$ .

В работе исследовались ОСЛ-выходы у образцов  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\delta$  в порошкообразном и монокристаллическом виде с различными нейтронными конверторами и их расположением. Сравнивались 4 варианта конвертирования. В двух из них были применены конверторы на базе  ${}^6\text{LiF}$  или  ${}^6\text{Li}_2\text{CO}_3$ , в которых изотоп  ${}^6\text{Li}$  при захвате нейтрона распадается на  ${}^3\text{H}$  и  $\alpha$ -частицу соответственно с энергиями 2,75 и 2,05 МэВ и пробегами в  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  30 и 4 мкм. Из-за малых пробегов  ${}^3\text{H}$  и  $\alpha$ -частицы исследуемые образцы изготавливались из гомогенных смесей порошков  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\delta$  и  ${}^6\text{LiF}$  или порошков  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\delta$  и  ${}^6\text{Li}_2\text{CO}_3$  в пропорции 1:1 с последующим компактированием в таблетки размером  $\varnothing 5 \times 0,3$  мм и их спеканием при 850-950 К. Размер частиц порошков не превышал 20-100 мкм. Отличительной особенностью состава из  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\delta$  и  ${}^6\text{Li}_2\text{CO}_3$  являлась плохая спекаемость и, как следствие, низкие прозрачность и прочность. В третьем и четвертом вариантах нейтроны конвертировались в гамма-излучение, которое регистрировалось

стандартным монокристаллическим ОСЛ-детектором на основе  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\cdot\delta$  размером  $\varnothing 5 \times 1$  мм. В качестве конверторов использовались металлический Cd с толщиной 0,2 мм и компактированный порошок  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  толщиной 0,9 мм.

Исследуемые детекторные составы одновременно со стандартным дозиметром, измеряющим  $\text{Hr}(10)$  только гамма-компонента, облучались на специальном фантоме в поле Pu-Be-источника. Мощности ИЭД для нейтронного и гамма-компонента были соответственно 1,87 мЗв/ч и 0,03 мЗв/ч. Суммарный ИЭД в каждом исследуемом случае составлял 45 мЗв. ОСЛ-выходы измерялись с использованием системы КОРОС-333. Эффективность разделения нейтронного и гамма-компонента  $R_N/R_\gamma$  определялась как отношение ОСЛ-выходов исследуемых составов при нейтронном ( $S_{\text{OSL}_N}$ ) и гамма- ( $S_{\text{OSL}_\gamma}$ ) облучении, нормированных на соответствующие ИЭД ( $D_N$  и  $D_\gamma$ ):

$$R_N/R_\gamma = [S_{\text{OSL}_N}/D_N]/[S_{\text{OSL}_\gamma}/D_\gamma]. \quad (1)$$

Полученные результаты суммированы в табл. 1. Как видно, наибольший ОСЛ-выход и соотношение  $R_N/R_\gamma$  имеет детекторный состав из  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\cdot\delta$  и  ${}^6\text{LiF}$ . Состав из  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\cdot\delta$  и  ${}^6\text{Li}_2\text{CO}_3$  обладает близким к первому составу соотношением  $R_N/R_\gamma$ , но крайне низким ОСЛ-выходом из-за его низкой прозрачности, что препятствует прохождению через него стимулирующего излучения и полезного ОСЛ-сигнала. У вариантов конвертирования с помощью  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  и Cd получено очень малое соотношение  $R_N/R_\gamma$ , и поэтому они не могут эффективно разделять вклады в ИЭД нейтронного и гамма-облучения. Основной причиной является крайне низкая ионизационная эффективность конверсионного гамма-излучения в сравнении с  ${}^3\text{H}$  и  $\alpha$ -частицей.

Таблица 1

**Характеристики исследуемых детекторных составов**

Детекторный состав	$S_{\text{OSL}_N}$ , о.е.	$R_N/R_\gamma$
$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\cdot\delta / {}^6\text{LiF}$	76368	0,96
$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\cdot\delta / {}^6\text{Li}_2\text{CO}_3$	8640	0,86
$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\cdot\delta / \text{Gd}_2\text{O}_3$	12192	0,005
$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\cdot\delta / \text{Cd}$	52896	0,014

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № 122021000030-1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Сюрдо А.И., Абашев Р.М., Красноперов В.С., Мильман И.И., Моисейкин Е.В., Бояринцев А.И. Автоматизированная система индивидуального дозиметрического контроля КОРОС-333 // Дефектоскопия. 2023. № 6. С. 73 — 74.

## МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТЕРМООБРАБОТАННОЙ И ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННОЙ СТАЛИ 38ХС

© 2024 г. Антон Михайлович Матосян<sup>1,2\*</sup>, А. Н. Сташков<sup>1\*\*</sup>, А. П. Ничипурук<sup>1</sup>,  
Е. А. Щапова<sup>1</sup>, Е. Ю. Сажина<sup>1</sup>, Н. В. Гордеев<sup>1,2</sup>, С. В. Афанасьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – *Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, 620108 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, д. 18*

<sup>2</sup> – *Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, 620002 Екатеринбург, ул. Мира, д. 19*

\* - *matosian01@gmail.com*; \*\* - *stashkov@imp.uran.ru*

Конструкционная легированная сталь 38ХС используется для изготовления деталей с высокими требованиями к прочности и износостойкости – шестерни, валы, пальцы, муфты, впускные клапаны двигателей. В процессе изготовления она подвергается закалке и последующему отпуску при температуре от 450 до 700 °С. Механические и магнитные свойства термообработанной стали 38ХС известны и хорошо изучены [1]. Цель данной работы заключалась в изучении поведения магнитных свойств стали 38ХС, подвергнутой термообработке и холодной пластической деформации.

Образцы из стали 38ХС в форме параллелепипедов с исходными размерами 10×10×65 мм подвергались закалке от 900 °С в масло и последующему отпуску при температурах 500, 600, 650, 700 и 750 °С. Часть термообработанных образцов утонялась до 4 мм и подвергалась пластической деформации растяжением в испытательной машине Instron 5982. Относительные удлинения образцов составили от 2 до 6 %. Магнитные измерения проводились на установке Remagraph С-500 и установке для измерения полевых зависимостей обратимой магнитной проницаемости [2]. Перемагничивание образцов осуществлялось в замкнутой магнитной цепи (пермеатре) по предельной петле гистерезиса.

Установлено, что при увеличении относительного удлинения образцов стали 38ХС коэрцитивная сила монотонно увеличивается, а остаточная индукция и максимальная магнитная проницаемость уменьшаются. Характер изменения коэрцитивной силы в зависимости от температуры отпуска меняется после холодной пластической деформации – если для недеформированных образцов коэрцитивная сила монотонно уменьшается при увеличении температуры отпуска, то после деформационных воздействий однозначное поведение коэрцитивной силы исчезает. По всей вероятности, причиной являются вносимые деформацией остаточные механические напряжения.

На рис. 1 приведены полевые зависимости сигнала измерительной катушки [2], пропорциональные обратимой магнитной проницаемости, для пластически деформированных образцов стали 38ХС, предварительно закаленных и отпущенных. Вид зависимостей до деформации примерно одинаков (кривые с единственным максимумом в районе коэрцитивной

силы не приведены), после деформации вид кривых кардинально меняется. Из рис. 1 видно, что для образцов с удлинением 2 % и температур отпуска 500 (а) и 650 °С (б) на кривых наблюдается единственный максимум, для образца с температурой отпуска 750 °С (в) справа от основного максимума становится различим перегиб. Еще более явные отличия на кривых наблюдаются для образцов с удлинением 4 % – для образца с температурой отпуска 500 °С наблюдается уширение пика, а для образцов с температурами отпуска 650 и 750 °С на кривых появляются заметные перегибы в положительном поле и раздвоение основного максимума. Появление перегибов и раздвоений основного пика указывает на наличие в образцах магнитной текстуры типа «легкая плоскость», вызванной деформацией. Отсутствие видимых особенностей на кривых для деформированных на 2 % образцов, отпущенных при 500 °С и 650 °С (рис.1 а,б), может быть вызвано изначально высокими хаотически распределенными напряжениями после термообработки, из-за которых не образуется магнитная текстура после деформации.

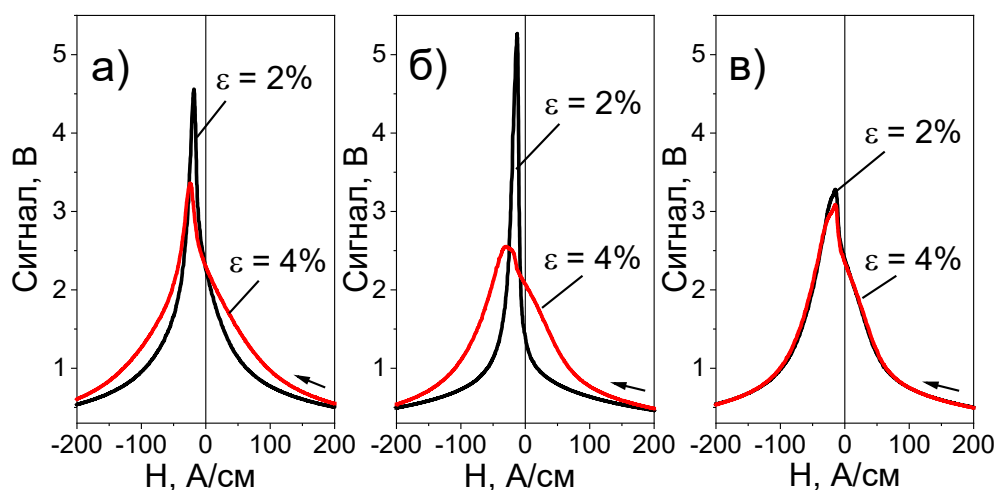


Рис. 1. Полевые зависимости сигнала измерительной катушки, пропорциональные обратной магнитной проницаемости, пластически деформированных образцов из стали 38ХС, предварительно закаленных и отпущенных при 500 °С (а), 650 °С (б) и 750 °С (в).

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», №122021000030-1).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Михеев М.Н., Морозова В.М., Вильданова Н.Ф., Гаврилова Л.Д., Захарова Г.Н., Ничипурук А.П., Ремез Н.В., Сингер К.Е., Чарикова Н.И. О возможности электромагнитного контроля качества закалки и отпуска изделий из стали 38ХС // Дефектоскопия. 1987. № 11. С. 38–44.
2. Stashkov A.N., Schapova E.A., Nichipuruk A.P., Stolbovsky A.V. Magnetic Incremental Permeability of Elastically Deformed Iron and Nickel // Journal of nondestructive evaluation. 2024. V. 4, No. 1. P. 8.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ В АСИММЕТРИЧНОМ ЦИКЛЕ «КОЭРЦИТИВНЫЙ ВОЗВРАТ-НАМАГНИЧИВАНИЕ»

© 2024 г. Данила Григорьевич Ксенофонтов<sup>1\*</sup>, О. Н. Василенко<sup>1\*\*</sup>, В. Н. Костин, Н. П. Лукиных<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – *Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 18*

\* - [ksefontov@imp.uran.ru](mailto:ksefontov@imp.uran.ru); \*\* - [vasilenko@imp.uran.ru](mailto:vasilenko@imp.uran.ru)

Параметры, измеряемые в асимметричном цикле «коэрцитивный возврат – намагничивание», такие как индукция коэрцитиваного возврата, индукция инверсии коэрцитивной силы и другие, являются перспективными для проведения магнитной структуроскопии [1].

Целью работы было определение факторов, влияющих на воспроизводимость результатов при измерениях в цикле «коэрцитивный возврат – намагничивание». Для этого с помощью АПС DIUS 1-21М были проведены измерения предельных петель гистерезиса и в асимметричном цикле «коэрцитивный возврат – намагничивание» на образцах из стали 20Н2М размером 10×10×65 мм с различными температурами закалки и отпуска. Измерения производились с использованием источников тока с различной разрешающей способностью.

В результате измерений были получены значения индукции коэрцитивного возврата  $B_{Hc}$  и индукции инверсии коэрцитивной силы  $B_{+Hc}$  и произведена оценка точности установки величины силы тока, соответствующей точке коэрцитивной силы (измерена минимальная магнитная индукция  $B_{min}$  в асимметричном цикле). Полученные значения представлены на рис. 1.

Установлено, что с уменьшением длины цикла перемагничивания величина  $B_{min}$  уменьшается, то есть становится дальше от 0. Это связано с магнитным последствием, вызванным действием вихревых токов и перераспределением намагниченности в составной магнитной цепи. При этом измеряемые значения  $B_{Hc}$  и  $B_{+Hc}$  увеличиваются.

Также наблюдается, что с уменьшением разрешения источника тока с 34,5 мА до 1,5 мА воспроизводимость результатов значительно улучшается: среднеквадратичное отклонение  $B_{min}$  уменьшается, зависимость  $B_{min}$  от температуры начинает носить линейный характер, максимальные среднеквадратичные отклонения  $B_{Hc}$  и  $B_{+Hc}$  также уменьшаются.

Величина  $B_{min}$  уменьшается с увеличением температуры отпуска, что может быть объяснено увеличением величины дифференциальной магнитной проницаемости, что приводит к увеличению плотности силы вихревых токов.

При комбинации мешающих факторов в виде малой длительности цикла перемагничивания и большой величины минимального изменения тока характер наблюдаемых

зависимостей может значительно изменяться, что может привести к неверной интерпретации полученных результатов.

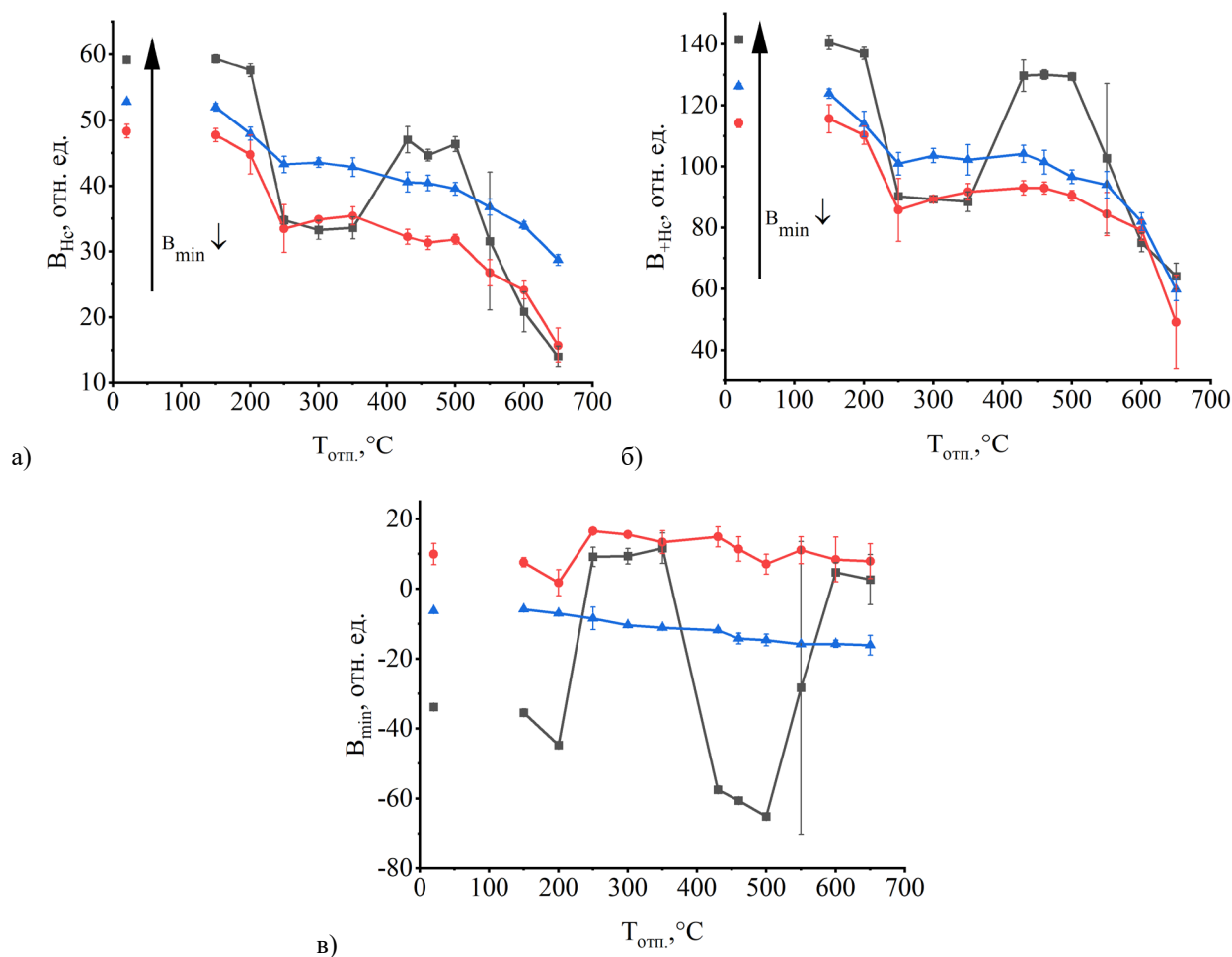


Рис. 1. Зависимости индукции коэрцитивного возврата  $B_{Hc}$  (а), индукции инверсии коэрцитивной силы  $B_{+Hc}$  (б) и минимальной магнитной индукции  $B_{min}$  в цикле «коэрцитивный возврат – намагничивание» (в) от температуры отпуска для стали 20H2M для различных режимов перемагничивания: (■) 10сек., (●) 30 сек., (▲) 30 сек. с повышенным разрешением источника тока.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России («Диагностика» (“Diagnostics”), №122021000030-1).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Костин В.Н., Василенко О.Н., Сандомирский С.Г. Структурная чувствительность параметров несимметричного цикла «коэрцитивный возврат — намагничивание» термообработанных низкоуглеродистых сталей // Дефектоскопия. 2018. №. 1. С. 5—15.
2. Костин В.Н., Сажина Е.Ю., Царькова Т.П., Сташков А.Н. О соотношении величин остаточной намагниченности и изменения намагниченности на кривых возврата сталей и сплавов // Дефектоскопия. 2001. № 12. С. 37—46.



## МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА СТАЛИ 09Г2С ПОСЛЕ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА ИЗГИБ

© 2024 г. **Никита Витальевич Гордеев<sup>1,2\*</sup>, А. Н. Сташков<sup>1\*\*</sup>, А. М. Матосян<sup>1,2</sup>, М. К. Корх<sup>1</sup>, Д. А. Шишкин<sup>1</sup>, И. Г. Ширинкина<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> – *Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, 620108 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, д. 18*

<sup>2</sup> – *Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 620002 Екатеринбург, ул. Мира, д. 19*

\* - *Gordeev.Nikita@urfu.me*; \*\* - *stashkov@imp.uran.ru*

Детали машин часто во время работы подвергаются циклическим нагрузкам. При воздействии длительных повторяющихся переменных воздействий стальные изделия могут разрушаться от усталости, причем разрушения могут происходить внезапно без заметных признаков пластической деформации [1]. В силу особого характера усталостного разрушения возникает потребность в разработке новых подходов и методов контроля, в том числе неразрушающих. Например, для контроля состояния ферромагнитных сталей применяют магнитные методы [2], так как магнитные свойства чувствительны к структурному и фазовому состоянию, а также к механическим напряжениям. Целью данной работы является изучение магнитных свойств и структуры образцов из стали 09Г2С, изготовленных методами литья и селективного лазерного сплавления и подверженных циклическим испытаниям при изгибе.

Исследования проведены на образцах из конструкционной стали 09Г2С с размерами 120×10×2 мм. Сравнивались литой образец (образец № 1), напечатанный на 3D принтере образец без термической обработки (образец № 2) и напечатанный на 3D принтере образец после нормализации при температуре 980 °С (образец № 3). Усталостные испытания на изгиб проводились на разработанной установке при консольном закреплении образцов. Коэффициент асимметрии R синусоидального цикла при усталостных испытаниях был задан -1. Условия нагружения образцов одинаковые. После испытаний с разных сторон образцов были вырезаны цилиндры диаметром 4 мм и толщиной 1 мм. Магнитные свойства были измерены с помощью вибрационного магнитометра Lake Shore Cryotronics VSM 7407. Исследования изломов образцов проводились с помощью оптического и сканирующего электронного микроскопа.

Установлено, что магнитные свойства в разных частях образцов после циклических испытаний различны - у образца № 1 коэрцитивная сила вблизи излома составляет 3,8 А/см, а у свободного края – 4,6 А/см (разница 21 %). Аналогичная тенденция к уменьшению коэрцитивной силы вблизи излома наблюдается у образца № 2 (11,8 А/см вблизи излома и 12,1 А/см у края) и у образца № 3 (5,1 А/см вблизи излома и 5,6 А/см у края). Количество циклов до разрушения составило: для образца № 1 – 73 287 циклов, для образца № 2 – 244660 циклов, для образца № 3 – 69 475 циклов. Чем больше количество циклов до разрушения, тем меньше относительная

разница коэрцитивной силы в разных частях образца. Остаточная магнитная индукция имеет такую же тенденцию.

Образец № 1 характеризуется прямым, однородным и усталостным изломом без обнаруженных очагов зарождения трещин, имеется зона долома (рис. 1а). Образец № 2 также имеет прямой излом, но он неоднороден, с несколькими очагами разрушения, формирующими асимметричную сеть ступенек и рубцов, сильно сдвинутую к одному из краев; также выявлена зона долома на одном из торцов (рис. 1б). Образец № 3 демонстрирует косой и неоднородный излом, с несколькими очагами разрушения, сливающимися в сеть ступенек и рубцов (рис. 1в).



Рис. 1. Оптические изображения изломов образца № 1 (а), образца № 2 (б) и образца № 3 (в), разрушенных от усталости.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», №122021000030-1).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор) Часть 1. Основные определения, параметры нагружения, представление результатов испытаний // Авиационные материалы и технологии. 2020. №4 (61). С. 59–70.
2. Stashkov A.N., Nichipuruk A.P., Schapova E.A., Gordeev N.V., Vshivtsev I.V., Kazantseva N.V. Magnetic Properties of Cyclically Tensile-Deformed Steel 09G2S Manufactured by Selective Laser Melting // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2023. V. 59, No. 1. P. 54–61.

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ЦЕМЕНТАЦИИ СТАЛЕЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ГРАДУИРОВОЧНЫХ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ВИХРЕТОКОВОГО СТРУКТУРОСКОПА

© 2024 г. Александр Викторович Бызов<sup>1\*</sup>, О. Н. Василенко<sup>1</sup>, Д. Г. Ксенофонтов<sup>1</sup>,  
В. М. Завьялов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – *Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, 620108 Екатеринбург,  
ул. Софьи Ковалевской, д. 18*

\* - *byzovav@imp.uran.ru*

В настоящее время для контроля толщины в основном используются акустические [1], магнитные методы [2,3] неразрушающего контроля. Однако акустические методы требуют наличие выраженной границы между сердцевиной и упрочненным слоем изделия. В случае магнитных методов, в частности [3], чувствительность к упрочненным слоям с толщиной меньше 3 мм может быть низкой. Однако для контроля слоев меньшей толщины могут быть использованы вихретоковые методы неразрушающего контроля. При этом и акустические, и магнитные измерительные системы, равно как и вихретоковые требуют наличия стандартных образцов, по варьируемой величине которых и величине измеряемого параметра измерительной системы строится градуировочная характеристика. Целью данной работы является разработка методики изготовления градуировочных образцов для дальнейшего их использования при измерениях вихретоковым структуроскопом.

В данной работе из полосы из стали 45 был вырезан образец размерами 49×5×4 мм и предварительно поверхностно обработан. Данный образец был подвержен твердой цементации, т.е. цементация осуществлялась с использованием карбюризатора. Сам карбюризатор представлял собой смесь из активированного угля (90 %) и углекислого бария (10 %). Время цементации составило 5,5 ч. Температура, при которой образец цементировался, была 920 °С. Для оценки глубины цементированного слоя с помощью электроэрозионной резки образец был разрезан на 2 равные части. Боковая грань образца, вдоль которой производилась резка, была отшлифована с помощью набора наждачной бумаги с зернистостью в диапазоне 60-2500. На полировальном круге в течение 10 минут грань образца обрабатывалась оксидом хрома, водный раствор которого подливался на круг в течение всего процесса полировки. Травление поверхности боковой грани образца производилось в вытяжном шкафу в 4%-растворе азотной кислоты в этиловом спирте в течение 10 секунд. Для оценки толщины цементированного слоя использовался оптический микроскоп Neophot 32. Изображение поверхности грани образца показано на рис. 1.

Как видно из представленных результатов, углеродистая доэвтектоидная сталь Ст45 за 5,5 ч процемнтировалась на глубину приблизительно 150 мкм. Процесс насыщения поверхности металла углеродом является времязатратным. В первую очередь это связано с выбранным

способом цементации. При твердой цементации прогрев ящика с карбюризатором занимает значительное время из-за низкой теплопроводности карбюризатора.

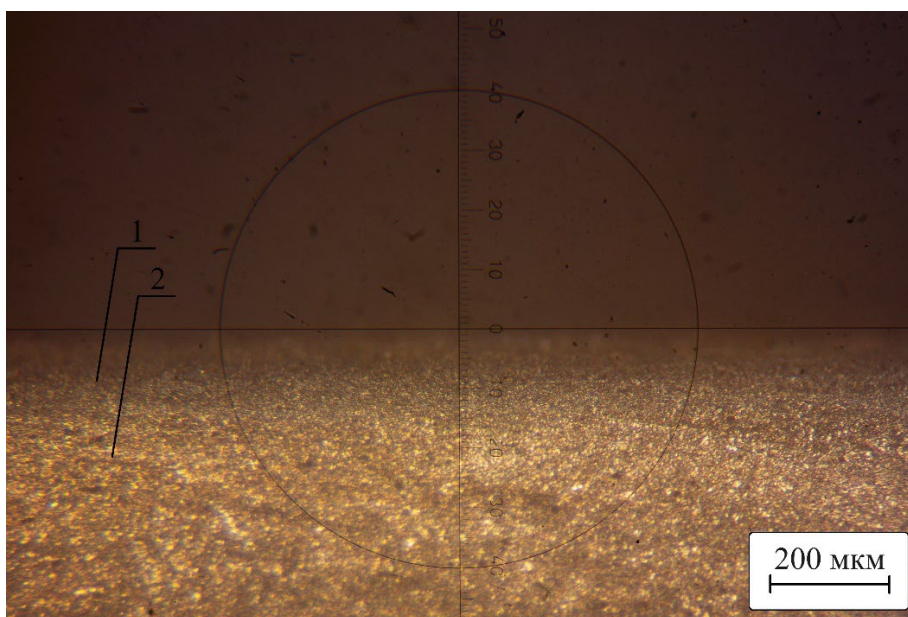


Рис. 1. Образец из стали 45 после цементации (1 – цементированный слой, 2 – сердцевина).

В результате данной работы показано, что из-за низкой теплопроводности карбюризатора диффузия углерода в поверхность изделия имеет низкую скорость, в связи с чем в заданных условиях глубина цементированного слоя оказалась равной 150 мкм. В дальнейшей работе образцы с цементированными слоями различной глубины будут использованы в качестве градуировочных для вихретокового контроля глубины поверхностного упрочнения стальных изделий.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России по теме «Диагностика», № 122021000030-1.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Баев А.Р., Майоров А.Л., Тищенко М.А. Ультразвуковой метод анализа поверхностного упрочнения металлических изделий // *Литье и металлургия*. 2010. № 4. С. 267—271.
2. Бида Г.В., Михеев М.Н., Костин В.Н. Определение размеров приставного электромагнита, предназначенного для неразрушающего контроля глубины и твердости поверхностно-упрочненных слоев // *Дефектоскопия*. 1984. № 8. С. 10—16.
3. Патент № 2782884 Российская Федерация. Способ селективного контроля глубины и качества поверхностного упрочнения изделий из ферромагнитных материалов: № 2022109732: заявл. 12.04.2022: опубликовано 07.11.2022 / В.Н. Костин, О.Н. Василенко, А.В. Бызов, Д.Г. Ксенофонтов; заявитель ИФМ УрО РАН.

# ИЗМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРУБ ПРИ ГИДРО- И ПНЕВМО- ИСПЫТАНИЯХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

© 2024 г. **Константин Евгеньевич Мызнов<sup>1\*</sup>, О. Н. Василенко<sup>1\*\*</sup>, В. Н. Костин<sup>1\*\*\*</sup>, В. С. Тронза<sup>2</sup>, А. Н. Бондина<sup>2</sup>, С. С. Кукушкин<sup>2</sup>, Н. Ю. Трякина<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> – *Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, 620108 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, д. 18*

<sup>2</sup> – *ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург», Екатеринбург*

\* - *myznov@imp.uran.ru*; \*\* - *vasilenko@imp.uran.ru*; \*\*\* - *kostin@imp.uran.ru*

Оценка напряжённо-деформированного состояния действующих трубопроводов является важной и давно изучаемой проблемой. Существует необходимость в определении местоположения наиболее опасных концентраторов напряжений в трубе при действии в ней внутреннего давления.

В данной работе были проведены исследования по выявлению взаимосвязи магнитных характеристик, полученных по предельной петле гистерезиса, с напряжённо-деформированным состоянием участков магистральных трубопроводов при гидро- и пневмо- испытаниях. Измерения проводились с помощью аппаратно-программной системы DIUS 1-21M [1].

В результате анализа данных, полученных при гидроиспытании, на трубе с внешним диаметром 1220 мм и толщиной стенки 20 мм, было обнаружено, что повышение внутреннего давления в трубе приводит на всех участках к значительному увеличению измеряемых значений остаточной магнитной индукции  $B_r$ . Изменение магнитных характеристик при гидроиспытании показано в табл. 1.

Таблица 1

**Изменение усредненных по двум направлениям измерений значений магнитных характеристик при увеличении давления в трубе с 0 до 20 кгс**

Сечение	Сторона трубы	$\Delta\langle H_c \rangle$ , %	$\Delta\langle B_r \rangle$ , %
сеч. 1	3 ч	-2,6	+26,3
	9 ч	+0,8	+16,8
	12 ч	+5	+40,7
сеч. 2	3 ч	-4,4	+30,3
	9 ч	+2,8	+15,8
	12 ч	+1,7	+13,5
сеч. 3	3 ч	+0,7	+17,3
	9 ч	-1,3	+26,5
	12 ч	+1,1	+39,7

Для аналогичной трубы было проведено гидроиспытание вплоть до разрушения трубы по продольному сварному шву. Для инициации разрушения на сварном шве на середине трубы был создан надрез. Измерения проводились по направлению вдоль оси трубы. На участке, расположенном близко к месту начала разрушения, выявлено наименьшее значение остаточной

магнитной индукции и пониженное значение коэрцитивной силы. Сравнение магнитных характеристик в точках, расположенных возле сварного шва ближе к краям трубы, до и после испытания показало, что коэрцитивная сила  $H_c$  в обеих точках имеет меньшее значение после проведения испытаний в сравнении с исходным состоянием (на 9,8 и 8,9 %), а значения остаточной магнитной индукции  $B_r$  на первой точке увеличились на 14,4 %, а на второй точке уменьшились на 13,3 %.

Для пневмоиспытания была выбрана труба с внешним диаметром 1440 мм и толщиной стенки 36 мм, на которой по продольному сварному шву был создан надпил глубиной в половину толщины стенки. Магнитные характеристики измерялись на расстоянии 50 мм от сварного шва. Обнаружено, что  $H_c$  и  $B_r$ , полученные вдоль оси, до испытания находились в диапазоне от 70,6 до 73 и от 455 до 498,5 отн. ед., а после разрушения от 62,1 до 75,7 и от 280 до 568 отн. ед., то есть увеличился разброс магнитных характеристик, в большинстве точек в сторону уменьшения.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России по теме «Диагностика», № 122021000030-1.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Костин В.Н., Василенко О.Н., Бызов А.В. Мобильная аппаратно-программная система магнитной структуроскопии DIUS-1.15M // Дефектоскопия. 2018, № 9. С. 47—53.

## ОПТИМИЗАЦИЯ МЕСТ РАСПОЛОЖЕНИЯ ДАТЧИКОВ ПОЛЯ И ПОТОКА В ПРИСТАВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ МАГНИТНЫХ СТРУКТУРОСКОПОВ

© 2024 г. Анастасия Владимировна Батueva<sup>1\*</sup>, В. Н. Костин<sup>1</sup>, О. Н. Василенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – *Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 18*

\* - *batuevaav@imp.uran.ru*

Для выбора конструкций и размеров намагничивающих устройств, а также для определения оптимальных мест расположения приставных преобразователей необходимы детальные сведения о пространственном распределении поля и потока внутри контролируемых объектов и над поверхностью таких объектов в зоне контроля. В настоящее время вопрос оптимизации типоразмеров и месторасположения приставных преобразователей и датчиков поля и потока остается открытым и актуальным [1, 2]. Целью данной работы является исследование пространственного распределения магнитных полей и потоков в замкнутой магнитной цепи «преобразователь-объект контроля» в зависимости от наличия и расположения щелей в полюсах П-образного приставного преобразователя для проведения магнитных измерений посредством датчиков поля.

В данной работе в программном пакете COMSOL Multiphysics были построены модели приставного преобразователя и объекта контроля. В качестве объекта контроля использовались образцы остаточной магнитной индукции (ОМИ). В качестве материала сердечника приставного преобразователя использовалось АРМКО-железо. Магнитные свойства выбранных образцов ОМИ были различны. Коэрцитивная сила материалов ОМИ варьировалась в диапазоне от 5,76 А/см до 81,1 А/см. Остаточная магнитная индукция варьировалась в диапазоне 0,216 Т до 1,52 Т. 3D модель приставного преобразователя при наличии 1 щели и образца ОМИ представлена на рис. 1(а). Фронтальный вид модели представлен на рис. 1(б).

В ходе работы проводилось исследование тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля в межполюсном пространстве преобразователя на поверхности объекта контроля от полюса 1 до полюса 2 при отсутствии щелей в приставном преобразователе, при наличии одной щели в полюсе 1, а также при наличии двух щелей в обоих полюсах приставного преобразователя. Межполюсное пространство равнялось 32 мм, центр находился в точке 16 мм, отсчитывая от грани полюса 1.

Результаты моделирования показали, что для моделей с приставным преобразователем без щелей и при наличии двух щелей положение координаты минимума тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля не меняется при изменении магнитных свойств объекта контроля и находится в точках 16,2 мм и 15,95 мм, соответственно. В результате расчёта моделей с приставным преобразователем, в котором имелась 1 щель, была обнаружена

асимметрия распределения тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля, т. е. наблюдалось смещение положения координаты минимума в сторону полюса, имеющего щель, что показано в табл. 1. Также на величину смещения влияли магнитные свойства материалов образцов ОМИ. Стоит отметить, что для материала со значением коэрцитивной силы 81,1 А/см, положение координаты минимума тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля находилось в точке 15,95 мм и не изменялось при наличии щелей, т.к. не достигалось техническое насыщение образца.

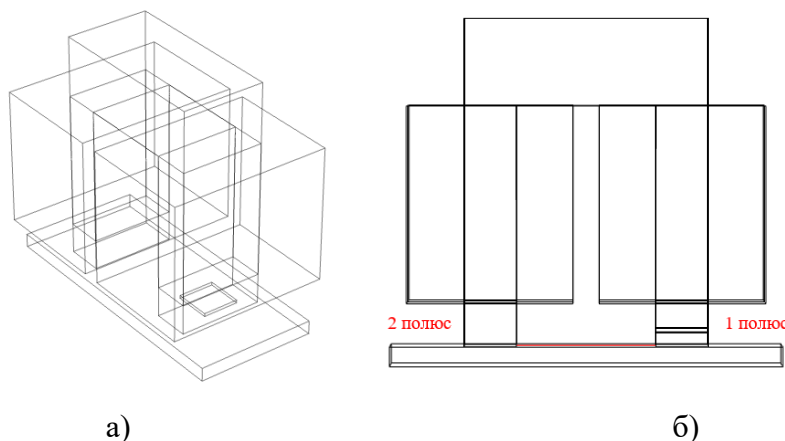


Рис. 1. 3D модель приставного преобразователя и образца ОМИ (а) и фронтальный вид модели (б).

Полученные результаты должны быть учтены при конструировании приставных преобразователей магнитных структуроскопов и при выборе месторасположения датчиков поля.

Таблица 1

Положение координат минимума  $H_t$

Материал	Без щелей	С 1 щелью	С 2 щелями
ОМИ 1	15.95 мм	15.95 мм	15.95 мм
ОМИ 4, ОМИ 5	16.22 мм	15.3 мм	15.95 мм
ОМИ 7, ОМИ 9	16.22 мм	13.59 мм	15.95 мм

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России по теме «Диагностика» №122021000030-1.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Костин В.Н., Лукиных О.Н., Смородинский Я.Г., Костин К.В. Моделирование пространственного распределения поля и индукции в локально намагничиваемых массивных объектах и оптимизация конструкции П-образных преобразователей // Дефектоскопия. 2010. № 6. С. 13—21.
2. Костин В.Н., Василенко О.Н., Бызов А.В. Мобильная аппаратно-программная система магнитной структуроскопии DIUS-1.15M // Дефектоскопия. 2018. № 9. С. 47—53.



# МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ РОБОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОКРЫТИЙ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

© 2024 г. Максим Сергеевич Губин<sup>1\*</sup>, В. В. Малый<sup>1\*\*</sup>, А. В. Федоров<sup>1\*\*\*</sup>,  
И. Ю. Кинжагулов<sup>1\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – Национальный исследовательский университет ИТМО, 197101

Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д.49, лит. А

\* - [gubin.maxim@mail.ru](mailto:gubin.maxim@mail.ru); \*\* - [banqvalera@mail.ru](mailto:banqvalera@mail.ru); \*\*\* - [afedor62@yandex.ru](mailto:afedor62@yandex.ru);

\*\*\*\* - [kinzhiki@mail.ru](mailto:kinzhiki@mail.ru)

На сегодняшний день многие изделия имеют сложную геометрическую форму. Например, к данным изделиям относятся теплообменные агрегаты (далее по тексту – Изделие сложной геометрической формы), предназначенные для обеспечения оптимального теплового режима работы высокотехнологичных агрегатов [1]. Представляют тела вращения, геометрические размеры которых варьируются в зависимости от решаемых задач.

Для обеспечения тепловых режимов, эксплуатируемого ресурса в большинстве случаев предусматривается нанесение специального двухслойного защитного покрытия на внутреннюю стенку (основание) [2]. Толщина покрытия и размеры дефектов в поверхностных и подповерхностных слоях должны находиться в допустимых диапазонах, отклонение от которых уменьшает эксплуатационный срок изделия, что является недопустимым. В целях обеспечения надлежащего уровня качества покрытия на предприятии-изготовителе предусматривается применение технологий вихретокового и магнитного контроля основных параметров изделий.

Применение существующих технологий неразрушающего контроля (НК) в ручном режиме влечет за собой недостаточную достоверность контроля в силу «человеческого фактора» и значительную трудоемкость контроля, так как необходимо соблюдать ряд требований:

- позиционирование по нормали преобразователя к поверхности изделия сложной геометрической формы;
- обеспечения контакта преобразователя и поверхности изделия сложной геометрической формы;
- перемещения преобразователя с заданной скоростью по поверхности изделия сложной геометрической формы;
- обеспечение тарированного прижима преобразователя к поверхности изделия сложной геометрической формы [3, 4]

Цель работы: повышение достоверности, оперативности НК качества покрытий изделий сложной геометрической формы за счет применения робототехнических комплексов, разработанных по данной методике.

Основные этапы проектирования робототехнических комплексов НК схожи между собой [5]. В результате разработки по данной методике определяется конструкция механизма(ов) позиционирования преобразователя(ей), конфигурация, количество звеньев, количество и типы

шарниров, конструкция захватного устройства преобразователя(ей), типы приводов и их размещение на механизме. При этом процесс разработки учитывает:

- 1 Основные параметры изделий сложной геометрической формы;
- 2 Требования для разработки формируемые в результате анализа вихретокового и пондеромоторного метода и выбранных датчиков;
- 3 Схемы и направления сканирования;
- 4 Допустимую область пространства для размещения изделий сложной геометрической формы и механизма(ов) позиционирования преобразователя(ей);
- 5 Требования, формируемые спецификой места установки механизма(ов) позиционирования преобразователей;
- 6 Допустимое время контроля основных параметров изделий сложной геометрической формы.

По результатам проделанной работы определены: зависимости между основными размерами изделий сложной геометрической формы и параметрами механизмов позиционирования (длин звеньев, диапазонов перемещений и углов поворотов кинематической схемы), влияние геометрии изделия сложной геометрической и схемы сканирования на скорость перемещения преобразователя. В результате построена модель механизма, отличающаяся высокой технологичностью, низкой ресурсоемкостью и удовлетворяющая основным требованиям. Планируется выполнить экспериментальную отработку механизма на изделии сложной геометрической формы с целью определения достоверности НК.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Добровольский М.В.* Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования: учебник для высших учебных заведений. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. 461 с.
2. *Калошин В.А.* Исследование и разработка метода неразрушающего контроля качества никелевых и никель-хромовых покрытий узлов жидкостных ракетных двигателей: дис. – научн.-исслед. ин-т интроскопии МНПО "Спектр". 2013. 173 с.
3. *Ганзен М.И.* Роботизированный вихретоковый контроль деталей ГТД с использованием нейронных сетей // Вестник РГАТА имени П.А. Соловьева. 2019. С. 65–70.
4. ГОСТ Р ИСО 15549-2009. Контроль неразрушающий. Контроль вихретоковый. Основные положения. М.: Стандартиформ, 2009. 12 с.
5. *Дорохов А.С., Загоруйко М.Г., Давыдова С.А. и др.* Новые механизмы робототехнических и измерительных систем. Гл. 4. Робототехнические комплексы в неразрушающем контроле. 2022. С. 123.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЖЕСТКОСТИ СЦЕПЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ПЕРЕДАЧУ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СИГНАЛА

© 2024 г. Анна Викторовна Костерина<sup>1\*</sup>, А. В. Теплякова<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup> – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В. И. Ульянова (Ленина), 197022 Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5 литера Ф  
\* - [Anna.VKosterina@gmail.com](mailto:Anna.VKosterina@gmail.com); \*\* - [smaest@mail.ru](mailto:smaest@mail.ru)

Акустический метод неразрушающего контроля является перспективным направлением в дефектоскопии, поэтому исследование его применимости для контроля различных объектов представляет собой актуальную задачу. Целью работы является анализ влияния ослабления крепежа во фланцевых соединениях сосудов, работающих под давлением, на параметры ультразвуковых волн.

Оценить зависимость амплитуды ультразвукового сигнала от приложенного контактного давления возможно с помощью пружинной модели, описанной в работе [1]. Она позволяет через межфазную жесткость перейти от давления, действующего на элементы фланцевого соединения, к коэффициенту отражения ультразвуковой волны:

$$|R| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2K}{\omega z}\right)^2}} \quad (1)$$

где  $z$  — акустический импеданс через границу раздела сред,  $\omega$  — угловая частота ультразвуковой волны.

Жесткость  $K$ , выраженная на единицу площади, определяется как изменение номинального контактного давления  $P_{nom}$ , необходимого для того, чтобы вызвать единичное сближение средних линий поверхностей:

$$K = \frac{dP_{nom}}{dU}, \quad (2)$$

где  $U$  – расстояние между средними линиями шероховатости двух поверхностей.

Зависимость амплитуды прошедшего сигнала через границу раздела двух стальных пластин от приложенного внешнего давления показана на рис. 1.

Как видно из рис. 1, амплитуда прошедшего сигнала при увеличении контактного давления возрастает, при этом зависимость имеет нелинейный характер.

Для экспериментальной проверки полученной теоретической зависимости использовался теневой метод ультразвукового контроля. Результаты измерений представлены на рис. 2.

Как видно из рис. 2, наиболее резкое изменение сигнала наблюдается на низких частотах при меньших давлениях, также на низких частотах происходит максимальное изменение амплитуды. При этом амплитуда импульсов изменяется до определенного уровня и достигает

насыщения. Эксперименты показали, что теньвым методом акустического контроля возможно определять ослабление контакта во фланцевом соединении.

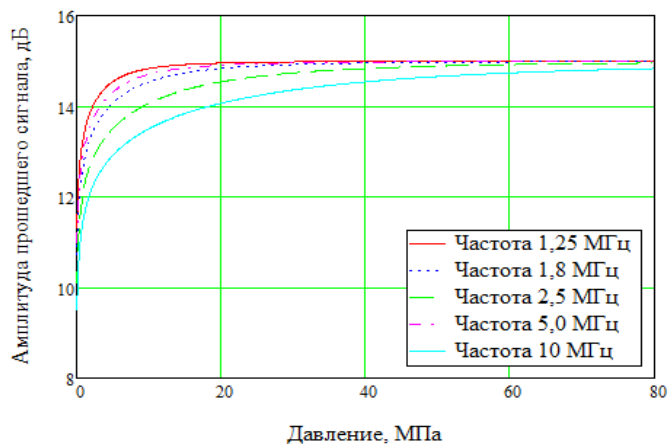


Рис. 1. Нормированная амплитуда прошедшего сигнала на различных частотах при увеличении давления на поверхности.

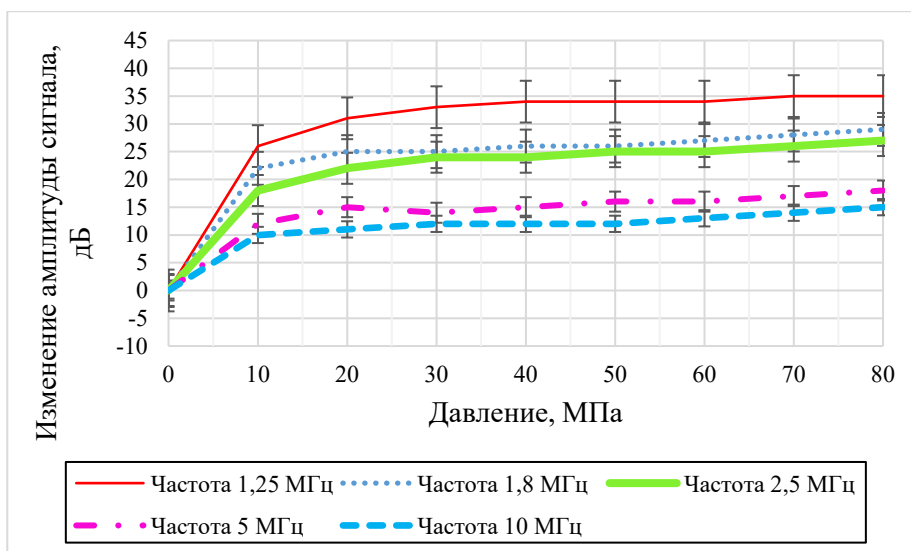


Рис. 2. Изменение амплитуды сигнала, прошедшего через границу сталь-сталь, на разных частотах при увеличении давления на поверхности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Marshall M.B., Lewis R., Howard T., Brunskill H. Ultrasonic measurement of self-loosening in bolted joints // ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C. Journal of Mechanical Engineering Science. 2012. V. 226(7). P. 1869—1884.
2. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.
3. Kendal K., Tabor D. An ultrasonic study of the area of contact between stationary and sliding surfaces // ProcR Soc Ser A. 1971. P. 321—340.
4. Drinkwater B.W., Dwyer-Joyce R.S., Cawley P. A study of the interaction between ultrasound and a partially contacting solid-solid interface // Proc. R. Soc. Ser. A. 1996. P. 2613—2628.

# ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ДИНАМИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧЕГО ТЕЛА И ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЕГО СВОЙСТВ

© 2024 г. Владимир Сергеевич Выплавень<sup>1\*</sup>, С. А. Бехер<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – *Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049 Новосибирск,  
ул. Дуси Ковальчук, д. 191*

\* - *vladimir97927@gmail.com*

В контексте взаимодействия рабочего тела и объекта контроля, численное решение обратной задачи динамики играет важную роль. Оно позволяет оценить свойства объекта контроля, такие как масса, сила и другие параметры, на основе известных данных о движении и воздействиях. Для решения обратной задачи используются физические и математические модели. С их помощью описываются физические процессы в объекте контроля, учитывая свойства материала, его геометрические параметры и граничные условия. Результатом моделирования являются теоретические диагностические сигналы неразрушающего контроля, которые могли бы быть получены в реальных условиях при заданных параметрах.

При решении обратной задачи теоретические диагностические сигналы сравниваются с зарегистрированными сигналами датчиков, измеряющих ту физическую величину, которая используется в модели. Критерием оценки совпадения теоретических и экспериментальных сигналов может являться значение корреляции сигналов или расстояние Евклида. Алгоритмам численного решения обратной задачи уделяется внимание в работах расчета модуля упругости дорожных одежд [1-3] и ультразвуковой дефектометрии [4]. Эти работы направлены на исследование применимости обратной задачи в измерении контролируемой величины и повышении точности результатов измерений.

В работе рассматривается использование численного решения обратной задачи для оценки упругих свойств балластной призмы при динамической нагрузке штампом, заключающееся в следующем. На балласт устанавливается нагрузочный штамп. С определенной высоты вдоль направляющей штанги на штамп падает груз. Нагрузка от этого груза передается через пружину, расположенную между штампом и грузом. При ударе штамп оказывает динамическое воздействие на балласт, которое эквивалентно нагрузке при эксплуатации [5]. Диагностическим сигналом с установки динамического штампа является вертикальное смещение штампа во время удара грузом. В общем виде модель перемещения штампа описывается дифференциальными уравнениями движения:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{u}_1 = -k_1 \cdot (u_1 - u_2) \\ m_2 \cdot \ddot{u}_2 = -k_2 \cdot u_2 + k_1 \cdot (u_1 - u_2) - c_2 \cdot \dot{u}_2' \end{cases} \quad (1)$$

где  $m_1$  – масса груза, кг;  $m_2$  – масса штампа с рабочей массой балласта, кг;  $u_1$  – смещение груза, м;  $u_2$  – смещение штампа, м;  $k_1$  – жесткость пружины, Н/м;  $k_2$  – жесткость балласта, Н/м,  $c_2$  – вязкость балласта, Н·с/м.

Решение обратной задачи заключалось в поиске значений параметров  $m_2, k_2, c_2, u_2$  таких, чтобы смоделированные диагностические сигналы были максимально близки к сигналам, полученным с установки динамического штампа. Решалась оптимизационная задача:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^N \dot{u}_2^i - \dot{U}_2^i/N} + \sqrt{\sum_{i=1}^N \dot{u}_2^i - \dot{U}_2^i/N} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $u_2^i$  – смоделированное значение смещения штампа в момент времени  $i$ , м,  $U_2^i$  – значение сигнала перемещения с установки динамического штампа в момент времени  $i$ , м,  $N$  – количество точек в сигнале.

Проведена серия экспериментов по оценке упругих характеристик уплотненного щебеночного балласта, в которых сравнивались значения модуля упругости балласта, полученных при статическом нагружении и при численном решении обратной задачи динамики. Сравнительные испытания показали расхождение в результатах не более 10 %.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сазонова С.А., Пономарев А.Б. Некоторые предпосылки применения динамического плотномера к определению модуля деформации грунта // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2018. Т. 9, № 3. С. 28–35. DOI:10.15593/2224-9826/2018.3.03.
2. Duddu S.R., Chennarapu H. Quality control of compaction with lightweight deflectometer (LWD) device: a state-of-art // International Journal of Geo-Engineering. 2022. V. 13, No. 6. DOI: 10.1186/s40703-021-00171-2.
3. Sysyn M., Gerber U., Liu J., et. al. Studying the Relation of the Residual Stresses in the Ballast Layer to the Elastic Wave Propagation // Transportation Infrastructure Geotechnology. 2023. V. 10. P. 962–987. DOI: 10.1007/s40515-022-00249-z.
4. Бадалян В.Г. Выявление и достоверность контроля в ультразвуковой дефектоскопии и дефектометрии // Контроль. Диагностика. 2020. № 7. С. 4–17. DOI 10.14489/td.2020.07.pp.004–017.
5. Kuttah D. Determining the resilient modulus of sandy subgrade using cyclic light weight deflectometer test // Transportation Geotechnics. 2021. № 27. P. 100482. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100482.

## ОЦЕНКА АКУСТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ В ОБРАЗЦЕ, ПОЛУЧЕННОМ МЕТОДОМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

© 2024 г. Алексей Леонидович Владыкин<sup>1\*</sup>

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

\* - [vladykin-ndt@mail.ru](mailto:vladykin-ndt@mail.ru)

Мартенситно-старяющие стали, обладающие высокой прочностью и вязкостью, нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. Благодаря своим уникальным свойствам, включая повышенную теплостойкость и низкий порог хладноломкости, эти стали позволяют создавать детали, способные выдерживать экстремальные тепловые и механические нагрузки. Важной особенностью мартенситно-старяющих сталей является их способность к упрочнению за счет термической обработки. Отжиг на твердый раствор, проводимый при высоких температурах, позволяет получить структуру материала с высокой пластичностью и прочностью.

В последние годы большое количество исследований, включая циклические испытания, было посвящено анализу микроструктуры и механических свойств мартенситно-старяющих сталей, полученных методом аддитивных технологий [1]. Отмечено, что твердость металлов, полученных методом прямого лазерного спекания, различается по разным частям готового образца, возможно и различие по структуре. После старения сплава увеличивается его твердость и прочность.

Целью исследования является оценка акустической анизотропии по скоростям продольных и поперечных волн в образце стали 17-4 PH, полученном методом аддитивных технологий.

Исследовался образец из стали 17-4 PH, изготовленный методом селективной лазерной плавки (SLM), после отжига на твердый раствор. Химический состав стали 17-4 PH (AISI): С – 0,07 %, Cr – 17 %, Ni – 4 %, Cu – 4 %. Образец выполнен в виде диска диаметром 75 мм и толщиной 15 мм.

При исследовании использован структуроскоп электромагнитно-акустический СЭМА с применением электромагнитно-акустического преобразователя, формирующего в образце плоско поляризованные поперечные волны, распространяющиеся нормально поверхности ввода. Для излучения продольной волны использован дефектоскоп DIO-1000 PA с пьезопреобразователем на основе гибкой пьезопленки ПВДФ. Распространение поперечных волн параллельно направлению оси роста образца, а продольных – перпендикулярно оси роста с вводом по цилиндрической поверхности (рис. 1). Преобразователи поперечных волн поворачивали на плоской поверхности образца, изменяя плоскость поляризации от 0 до

170 градусов. В этом же направлении излучались продольные волны с боковой поверхности. Регистрируемое время распространения волн пересчитывали с учетом пути в соответствующие скорости. Погрешность определения скорости объемных волн не превышала  $\pm 2$  м/с.



Рис. 1. Направление поляризации поперечной волны (а) и продольной волны (б).

Результаты определения скоростей упругих волн представлены в табл. 1.

Таблица 1

Скорость объемных волн в образце стали 17-4 PH после отжига

Угол поворота	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$C_t$ , м/с	3139	3139	3139	3139	3139	3138	3118	3118	3117
$C_l$ , м/с	5815	5816	5813	5801	5794	5789	5793	5799	5805
Угол поворота	90	100	110	120	130	140	150	160	170
$C_t$ , м/с	3118	3117	3118	3117	3139	3140	3140	3140	3140
$C_l$ , м/с	5810	5811	5803	5793	5792	5814	5797	5825	5819

В результате исследований установлено, что скорость поперечной волны резко изменяется на 20 м/с при 50 градусов относительно первоначального положения плоскости поляризации луча, что указывает на существенную анизотропию образца. Данный переход повторяется через 90 градусов. Скорость продольной волны плавно изменяется на величину около 20 м/с с периодичностью 45 градусов относительно первоначального положения, что также указывает на анизотропию образца.

Таким образом, проведенные исследования показали возможность оценки анизотропии свойств по скорости упругих волн в образцах дисперсионно-старееющих сталей, изготовленных методом аддитивного производства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Владыкин А.Л. Акустические и электромагнитные свойства мартенситно-старееющего железохромоникелевого сплава с добавлением меди при механическом растяжении // Дефектоскопия. 2023. № 5. С. 12—20. DOI 10.31857/S0130308223050020. EDN YZXLMH.



# ОПТИМИЗАЦИЯ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРИБОРА ДИНАМИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМИ КАТУШКАМИ ИНДУКТИВНОСТИ

© 2024 г. Олег Александрович Колганов<sup>1\*</sup>, А. В. Фёдоров<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup> – Университет ИТМО, 197101 Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49

\* - kolganoff2014@yandex.ru; \*\* - afedor62@yandex.ru

В настоящее время оценка механических характеристик материалов изделий является актуальной задачей в различных отраслях промышленности. На данный момент для решения данной задачи широкое применение находят безобразцовые методы и портативные средства. Применение этих методов и средств там, где это возможно, снижает конечную стоимость продукции и повышает оперативность контроля. Одним из перспективных методов безобразцового контроля механических свойств материала образцов и изделий является метод динамического инструментального индентирования. Сущность метода заключается в непрерывной регистрации параметров движения индентора в процессе его контактного ударного взаимодействия (КУВ) с испытываемым материалом. В настоящее время для регистрации параметров движения ударника при КУВ применяется магнитоиндукционный метод. Применение этого метода регламентируется ГОСТ Р 56474-2015 [1]. При КУВ магнит, жестко закрепленный с индентором, вызывает изменение магнитного потока при прохождении через катушку индуктивности. При этом, в последней наводится сигнал электродвижущей силы (ЭДС), пропорциональный скорости движения индентора на всем временном интервале его КУВ. Главным требованием к первичным преобразователям прибора ДИИ является линейная зависимость изменения ЭДС от скорости движения магнита. Для повышения линейности изменения скорости движения магнита предлагается применение дифференциальной катушки индуктивности. Преимуществом дифференциальной схемы включения катушки индуктивности для датчика динамического инструментального индентирования заключается в расположении магнита при КУВ, а именно, в процессе КУВ полюса магнита находятся внутри дифференциальной катушки индуктивности. Таким образом, ввиду симметричности конструкции минимизируется зависимость ЭДС наводимой в катушке индуктивности от перемещения магнита при условии, что диапазон перемещений многократно меньше суммарной высоты катушек и лежит в области раздела катушек индуктивности [3].

ЭДС, наводимое к катушке индуктивности при движении магнита, зависит от множества абсолютных параметров, которые тесно взаимосвязаны друг с другом, является трудно выполнимой. Для упрощения решения данной задачи предлагается перейти к относительным параметрам первичного преобразователя.

Целью данной работы является решение задачи оптимизации значений параметров первичного преобразователя прибора динамического инструментального индентирования с дифференциальных катушек индуктивности.

Рассматривая вопрос оптимизации значений параметров первичного преобразователя, была использована разработанная компьютерная модель, принцип которой заключается в регистрации возникающей в дифференциальной катушке индуктивности ЭДС при пролете постоянного магнита с ускорением свободного падения. Для проведения исследования закономерностей влияния параметров первичного преобразователя на регистрируемый сигнал ЭДС была выполнена оценка максимального значения ЭДС ( $ЭДС_{max}$ ) при изменении параметров дифференциальной катушки индуктивности и постоянного магнита. Согласно разработанному алгоритму определения оптимальных параметров катушки индуктивности проводились исследования по определению значений параметров первичного преобразователя. Для принятых относительных параметров первичного преобразователя и максимального значения ЭДС были построены зависимости. Оптимальные параметры первичного преобразователя определялись по локальным экстремумам полученных зависимостей.

Таким образом, был рассмотрен первичный преобразователь для прибора динамического инструментального индентирования с дифференциальной катушкой индуктивности. Рассмотрен вопрос оптимизации значений параметров первичного преобразователя на основе дифференциальных катушек индуктивности. Построены зависимости относительных параметров первичного преобразователя и максимального значения ЭДС. Определены значения параметров первичного преобразователя для прибора динамического инструментального индентирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 56474-2015 Системы космические. Контроль неразрушающий физико-механических свойств материалов и покрытий космической техники методом динамического индентирования. Общие требования.
2. Крень А.П., Рабцевич А.В., Зинкевич Н.В. Моделирование ударного контакта индентора с нежесткими стальными конструкциями при изменении твердости // Известия национальной академии наук Беларуси. Серия Физико-технических наук. 2017. № 4. С. 38–45.
3. Kolganov O., Egorov R., Ilyinsky A., Khoshev A., Kinzhagulov I., Fedorov A., Lukyanov G. Development of an Algorithm for Calculating the Parameters of the Primary Sensor Transducer for a Dynamic Indentation Device // 7th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT 2023), 2023. P. 1–5.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОПОР ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПО ИХ ДИНАМИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

© 2024 г. Алексей Николаевич Кожевников<sup>1\*</sup>, Т. В. Бурнышева<sup>1\*\*</sup>, П. В. Ласточкин  
<sup>1</sup> – ФГБОУ ВО НГТУ, 630073 Новосибирск, пр-т К. Маркса, д. 20  
\* - kozhevnikov.2010@corp.nstu.ru; \*\* - tburn@mail.ru

Воздушные линии электропередачи (ВЛ) представляют собой совокупность трех принципиальных элементов: проводников электрического тока, изолирующей подвески для исключения негативных эффектов и опор ВЛ, поддерживающих провода на необходимом расстоянии над поверхностью Земли [1]. Обрывы проводов или разрушения гирлянд изоляторов представляют собой относительно частое явление, при котором энергоснабжение может быть восстановлено достаточно оперативно. Разрушение же опор воздушных линий электропередачи приводит к прекращению передачи электрической энергии на длительный срок вследствие необходимости замены поврежденной опоры на новую, что также сопряжено с существенными затратами ресурсов обслуживающих организаций [2].

Определение технического состояния опор ВЛ на текущий момент реализовано посредством двух периодических процессов: визуальный осмотр конструкций дважды в год в периоды смены сезонов года и детальный инструментальный контроль через регламентированные интервалы времени: не реже, чем раз в шесть лет для опор и другие сроки для отдельных элементов системы транспорта электрической энергии. При заявленном сроке эксплуатации не менее 50 лет для металлических конструкций и вплоть до 70 лет для железобетонных существенная часть эксплуатируемых опор ВЛ уже превысила заявленный ресурс или находится на грани его выработки. Поэтому задача определения фактического технического состояния является актуальной для электроэнергетической отрасли.

Цель исследования заключалась в разработке и тестировании методики неразрушающего контроля для определения технического состояния опор воздушных линий электропередачи [3].

Опоры воздушных линий электропередачи относятся к строительным сооружениям, и их техническое состояние может быть определено на основании Государственного стандарта по уровню изменения динамических параметров: частот или периодов и логарифмических декрементов собственных колебаний [4]. Однако для распространения указанного подхода к диагностированию состояния опор ВЛ необходимо оценить эталонные значения динамических параметров для конструкций в исправном состоянии, относительно которых и определяется степень поврежденности сооружения. На разработку методики определения фактического технического состояния опор ВЛ и направлена представленная работа.

Разработанная методика определения фактического технического состояния состоит из

следующих последовательных этапов:

1. Расчетное исследование с применением программ конечно-элементного моделирования для определения опорных значений частот собственных колебаний опор в исправном техническом состоянии. На этом этапе возможно учесть влияние типовых эксплуатационных повреждений с целью их дальнейшей идентификации [3].

2. Экспериментальное определение фактических частот собственных колебаний рассчитанных ранее конструкций. Этот этап сопровождается визуальным осмотром конструкций для исключения очевидных повреждений, например, отсутствие силовых элементов, чрезмерное накренивание и т.д. Обследование отдельной опоры занимает не более десяти минут.

3. Сопоставление результатов расчета и эксперимента с целью распределения обследованных конструкций на группы технического состояния: исправные, работоспособные и ограниченно-работоспособные. Критерием попадания в каждую из групп является снижение значений частот собственных колебаний на заданный уровень. Пороговые значения могут назначаться на основании опыта, научных изысканий или других заданных требований.

Таким образом, в ходе реализации исследования была разработана и апробирована методика, позволяющая выявлять опоры различного фактического технического состояния на основании результатов экспресс-оценки динамических параметров. По результатам тестирования методики на 49 опорах Томской области было выявлено 38 исправных опор, 8 работоспособных и 3 ограниченно-работоспособных конструкций. Для опор также были сформулированы рекомендации по поиску дефектов и их примерная локализация.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Кожевников А.Н., Бурнышева Т.В.* Применение методов моделирования в расчетах на прочность опор воздушных линий электропередачи при динамическом деформировании // Научно-технический вестник Поволжья. 2020. № 10. С. 66—68.
2. *Левин В.Е., Кожевников А.Н., Сафонов О.Н.* К вопросу о расчете опор и участков воздушных линий электропередачи // Электроэнергия. Передача и распределение. 2017. № 6 (45). С. 68—72.
3. *Бурнышева Т.В., Кожевников А.Н.* Методика оценки технического состояния опор воздушных линий электропередачи с учетом типовых эксплуатационных дефектов // Инженерный журнал: наука и инновации: электрон. журн. 2021. № 2 (110). С. 1—12.
4. ГОСТ 31937—2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. Москва: Изд-во стандартов, 2011. 95 с.

# ВЛИЯНИЯ ДВУХОСНОГО МЕХАНИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ПРУЖИННОЙ СТАЛИ 65Г НА ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ГАРМОНИЧЕСКОГО СПЕКТРА, ПОЛУЧЕННОГО ПО ПЕТЛЕ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА

© 2024 г. Игорь Сергеевич Малахов<sup>1\*</sup>, Р. А. Соколов<sup>1\*\*</sup>, К. Р. Муратов<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – Тюменский индустриальный университет, 625000 Тюмень, ул. Володарского, д. 38

\* - [malahov.u.c@gmail.com](mailto:malahov.u.c@gmail.com); \*\* - [falcon.rs@mail.ru](mailto:falcon.rs@mail.ru); \*\*\* - [muratovkr@tyuiu.ru](mailto:muratovkr@tyuiu.ru)

Исследуя магнитные свойства и структуру различных материалов при механическом воздействии, можно получить результаты, которые могут быть использованы, например, для определения механических напряжений и определения напряженно-деформированного состояния металлических объектов.

В данной работе одной из ключевых задач является исследование влияния напряженно-деформированного состояния, вызванного двусосным нагружением исследуемого образца пружинной стали, на ее магнитные параметры. Подобного рода исследования были проведены, например, в работе [1].

Петля магнитного гистерезиса является наиболее информативной характеристикой ферромагнетиков, включает в себя многие магнитные параметры материала, такие как намагниченность, индукция насыщения, коэрцитивная сила и др. [2, 3].

Исследуемые образцы были изготовлены из стали 65Г в состоянии поставки.

Для создания сложного нагружения была использована лабораторная установка, позволяющая растягивать образец в двух взаимоперпендикулярных направлениях. Создаваемая нагрузка лежала в пределах упругой области для изучаемого материала. Было использовано как одноосное, так и двухосное нагружение. Максимальная нагрузка не превышала 10 МПа. Шаг нагрузки составлял 1 МПа. Для регистрации петель магнитного гистерезиса использовалось устройство АПС DIUS-1.15М. Регистрируемые петли преобразовывались во временной сигнал, который анализировался при помощи спектральной функции Фурье. Обработка данных и извлечение гармонических составляющих петли осуществлялось в программах [4, 5].

На рис. 1 представлены зависимости величины амплитуды  $A_k$ , где  $k$  – нечетное число, от механических напряжений  $\sigma$  (равномерного по двум осям растяжения) для петель, снятых при положении измерительного блока, совпадающего с вертикальной осью нагружения.

Из полученных экспериментальных данных следует, что при увеличении внешней двухосной растягивающей нагрузки, для остаточной индукции и коэрцитивной силы происходит однозначное изменение величины. В рассматриваемом диапазоне нагрузок изменение величины коэрцитивной силы лежит в пределах 4 % от начальных, для остаточной индукции – 6 %. Изменение индукции насыщения в рассматриваемом диапазоне нагрузок происходит неоднозначно. Резкое падение значений для остаточной индукции и индукции насыщения в

районе нагрузок, равных 5 МПа, возможно говорит о процессах перераспределения внутренних остаточных напряжений в образце. Эти изменения наиболее наглядно наблюдаются и для гармонического спектра, где изменения при этой нагрузке относительно первоначального значения могут достигать 40 %.

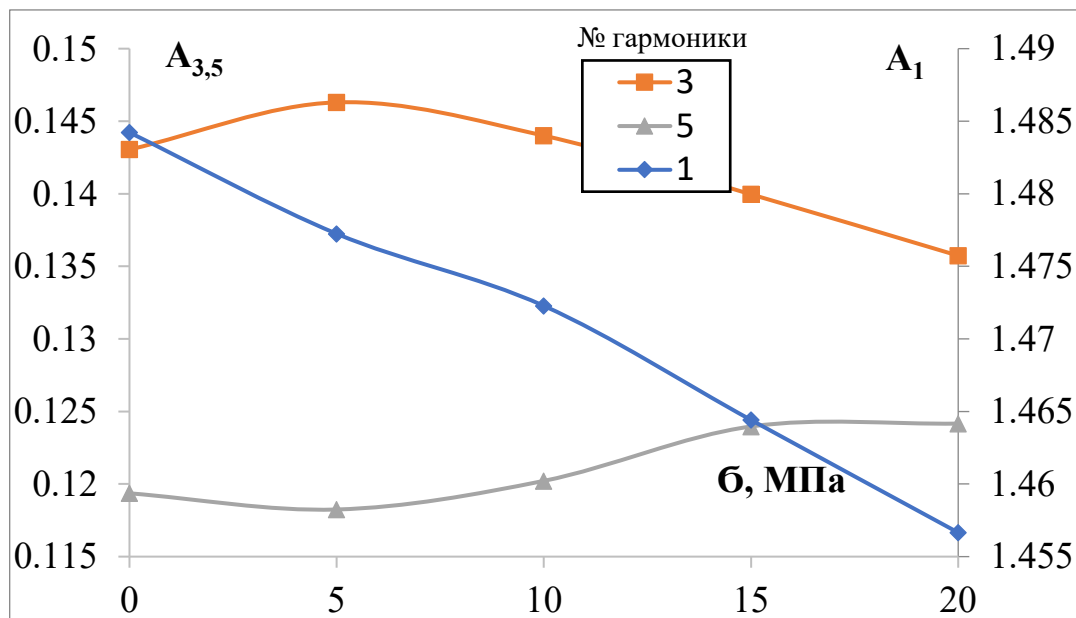


Рис. 1. Зависимости величины первой, третьей и пятой гармоник от величины внешней двухосной нагрузки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков В.Ф., Захаров В.А., Ульянов А.И., Сорокина С.В., Кудряшов М.Е. Влияние двухосной упругой деформации на коэрцитивную силу и локальную остаточную намагниченность конструкционных сталей // Дефектоскопия. 2010. № 7. С. 59—68.
2. Киренский Л.В. Ферромагнетизм и его применение. Москва: Учпедгиз, 1957. 560 с.
3. Чжан А.В. Процессы перемагничивания и доменная структура ферромагнетиков: монография. Лань: электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/130146> (дата обращения: 16.05.2023).
4. Соколов Р.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022662386 Российская Федерация. Hysteresis: № 2022660697: заявл. 08.06.2022: опубл. 01.07.2022.
5. Муратов К.Р., Соколов Р.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022667731 Российская Федерация. Программа для определения гармонических составляющих дискретного сигнала "Спектр": № 2022667054: заявл. 16.09.2022: опубл. 23.09.2022.

# АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ НА БАЗЕ «ЛАЗЕР-КАМЕРА» ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛОПРОКАТА

© 2024 г. Вячеслав Владимирович Коняшов<sup>1,2\*</sup>, А. С. Сергеев<sup>1\*\*</sup>,  
О. А. Колганов<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – Университет ИТМО, 197101 Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49 лит. А  
<sup>2</sup> – ООО «НТЦ «Эталон», 197343 Санкт-Петербург, ул. Матроса Железняка, д. 57 лит. А  
\* - [konyashovslavaa@mail.ru](mailto:konyashovslavaa@mail.ru); \*\* - [alex.sergeev115@gmail.com](mailto:alex.sergeev115@gmail.com);  
\*\*\* - [kolganoff2014@yandex.ru](mailto:kolganoff2014@yandex.ru)

Для решения задачи автоматизированного контроля качества металлопроката в условиях производственного цикла металлургических предприятий используются системы технического зрения (СТЗ). По результатам обработки данных, полученных СТЗ, производится аттестация поверхности продукции, по результатам которой принимается оперативное решение по логистике произведенной продукции в соответствии с категорией качества, корректируются входные параметры систем автоматического регулирования прокатных станов и технологии производства [1]. Расширение требований к качеству горячекатаного металлопроката, наряду с развитием автоматизированных систем управления технологическим процессом прокатки, накладывают ряд ограничений на реализуемые в СТЗ алгоритмы обработки цифровых изображений, обусловленных условиями производства и требованиями к достоверности результатов контроля [2].

Целью исследований являлась разработка и экспериментальная апробация алгоритмического обеспечения обработки цифровых изображений в СТЗ на базе «лазер-камера», обеспечивающего повышение достоверности автоматизированного детектирования поверхностных дефектов листового горячекатаного металлопроката в реальном времени.

В ходе экспериментального моделирования влияния факторов, связанных с неравномерностью коэффициента отражения поверхности и изменением угла падения лазерного излучения при наличии отклонений от плоскостности листового проката, а также при изменении толщины листа проката установлен диапазон углов триангуляции, при которых происходит частичное и полное искажение изображения, а также определена область интереса (ROI) матрицы камеры, удовлетворяющая условию изменения толщины проката. Установлено, что при нормальной схеме расположения лазера и камеры на фиксированной базе при угле триангуляции  $\alpha = 30^\circ$  от зачищенного участка наблюдается минимальная область засветки, которая может быть исправлена методом двусторонней и медианной фильтрации. При увеличении угла триангуляции на значение  $\Delta\alpha$  более чем  $15^\circ$  наблюдаются области засветки, со значением интенсивности, превышающей интенсивность лазерной линии.

Разработан алгоритм детектирования поверхностных дефектов листового горячекатаного проката для СТЗ, включающий алгоритм обработки исходных изображений для определения положения лазерной линии на изображении (в т.ч. регистрация изображений от блока «лазер-камера»), обработка изображений методами двусторонней и медианной фильтрации, пороговая обработка изображений, фильтрация одиночных выбросов на изображении, поиск центра лазерной линии, анализ и исправления бликов в пределах центра лазерной линии, добавление значений интенсивностей центральной линии лазера в карту интенсивностей, преобразование центральной линии лазера в массив глубин). Результатом реализации алгоритма обработки исходных изображений является построение карты глубин и карты интенсивности поверхности листового металлопроката.

В предложенном алгоритме для повышения достоверности детектирования плоскостных и объемных дефектов осуществляется комплексный анализ карты глубин и карты интенсивностей. Результатом реализации алгоритма детектирования является формирование дефектограмм, содержащих информацию о местоположении дефектов на листе, их количестве и размерах (глубине и площади).

Для реализации алгоритма детектирования поверхностных дефектов листового горячекатаного проката использовались камера технического зрения MX022MG-СМ (2048x1088; 2,2 Мп) с объективом LINOS MeVis C (25 мм; F1,6) и линейный лазерный источник освещения Osela Streamline laser (200 мВт; 450 нм).

В ходе экспериментальной апробации алгоритма подтверждена выявляемость поверхностных дефектов горячекатаного металлопроката глубиной от 200 мкм, площадью от 1 мм<sup>2</sup>, а также подтверждена возможность исключения ложных пиков интенсивности на матрице камеры, вызванных бликами и переотражениями лазерной линии в местах зачистки.

Интеграция в СТЗ разработанного алгоритма позволит повысить достоверность результатов автоматизированного контроля качества металлопроката с неравномерной отражающей поверхностью в режиме реального времени.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Гарбар Е.А., Логунова О.С., Маркевич А.В.* Системы оптического контроля качества поверхности стальной полосы // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. № 2. С. 299—305.
2. *Ковалева И.А.* Исследования дефектов горячекатаного проката сортопрокатного цеха №1 стана 850, имеющих прокатную природу образования, на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» // Литье и металлургия. 2019. № 2. С. 60—66.



## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПЛАСТИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

© 2024 г. Татьяна Сергеевна Абрамова<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> – ФГБОУ ВО Сибирский государственный университет путей сообщения,  
630049 Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 191

\* - [t.abramova\\_sgups@mail.ru](mailto:t.abramova_sgups@mail.ru)

**Введение.** Аддитивные технологии активно развиваются, реализуя принцип кастомизированного производства, они позволяют оперативно заменить вышедшие из строя оригинальные детали [1]. Для ответственных изделий, к которым предъявляются повышенные требования надежности, необходимо обеспечить заданный уровень качества 3D-печати. Однако при изготовлении могут появиться специфичные для данной технологии типы дефектов, такие как несплавления и слабая адгезия между слоями [2].

Не все традиционные методы неразрушающего контроля возможно применить при контроле пластиковых изделий, но метод акустической эмиссии хорошо зарекомендовал себя при контроле деталей, изготовленных из композиционных материалов [3]. Важной проблемой является разработка методики неразрушающего контроля пластиковых изделий с использованием перспективного метода акустической эмиссии для обнаружения развивающихся дефектов.

Цель работы – применить метод акустической эмиссии для контроля пластиковых образцов, изготовленных методом послойного наплавления, установить закономерности для создания методики контроля.

**Материалы и оборудование.** Для исследования на 3D принтере было напечатано по пять плоских образцов методом послойного наплавления для следующих видов пластика: *ABS* и *PETG*. Длина рабочей части образцов составляет 100 мм, площадь поперечного сечения – 16 мм<sup>2</sup>. Для создания концентратора напряжения в середине каждого образца было сделано отверстие диаметром 1 мм. Образцы растягивались до разрушения на установке МИ-40КУ с постоянной скоростью перемещения захватов 5 мм/мин. Регистрация АЭ сигналов выполнялась системой СЦАД 16.03. Через усилители к системе подключались датчики GT200 с порогом фиксации на входе предварительного усилителя 5 мкВ. Разрушенные образцы исследовались под микроскопом Альтами MET 1С для определения повреждений и характера излома.

**Анализ результатов.** В ходе эксперимента регистрировались сигналы, анализ полученных сигналов проводился по числу импульсов, активности и амплитудного распределения. Результаты сопоставлялись с диаграммой нагрузки и характером повреждений на поверхности образцов после разрушения.

Суммарно для пяти образцов из *PETG*-пластика зарегистрировано около 300 сигналов, а у *ABS*-пластика – в 2 раза меньше, 154. Зарегистрированные сигналы приходили не только из рабочей части образца, но и из захватов, в которых установлен образец. Для разделения этих сигналов применена линейная локация по разнице времени прихода. Результаты экспериментов показали, что *PETG*-пластик выдерживает нагрузку на 30 секунд дольше, чем *ABS*-пластик. Увеличение активности сигналов перед разрушением в 3 раза наблюдается у двух пластиков. Резкий скачок активности позволит обнаружить пред разрушающее состояние при нагрузке, составляющей (10-15) % от предела прочности образца.

**Выводы.** При разрушении пластиковых образцов регистрировались акустические сигналы, которые связаны с деформациями, возникающими в образце. По результатам обработки сигналов наблюдается резкий рост активности сигналов перед разрушением. Применяя метод акустической эмиссии, можно определить пред разрушающее состояние за (10-15) % от предела прочности образца.

Метод акустической эмиссии перспективен для создания методик контроля не только пластиковых образцов, но и деталей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мишин И.М. Применение аддитивных технологий при ремонте подвижного состава // Железнодорожный транспорт. 2019. № 8. С. 75—77.
2. Холодилов А.А., Пузынина М.В. Проблемы, возникающие при трехмерной печати объектов с использованием технологии FDM // Наука, образование, инновации: апробация результатов исследований. 2017. № 1. С. 199—204.
3. Степанова Л.Н., Лебедев Е.Ю., Кареев А.Е. [и др.]. Регистрация процесса разрушения образцов из композиционного материала методом акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2004. № 7. С. 34—41.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ

© 2024 г. Алексей Максимович Шмаков<sup>1\*</sup>, А. В. Федоров<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup> – Университет ИТМО, 197101 Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, д. 49

\* - [alyosha-shmakov@yandex.ru](mailto:alyosha-shmakov@yandex.ru); \*\* - [afedor62@yandex.ru](mailto:afedor62@yandex.ru)

Целью настоящей работы является обоснование возможности применения ультразвукового эхо-метода для контроля качества полимерных композиционных покрытий (ПКП). Задачами настоящей работы является апробация двух методов ультразвукового контроля – с пьезоэлектрической и оптико-акустической генерацией упругих колебаний, на экспериментальных образцах полимерных композиционных покрытий.

Авторами настоящей работы предложено использовать ультразвуковой эхо-метод для контроля качества ПКП. При контроле эхо-методом один и тот же преобразователь является генератором и приемником ультразвуковых колебаний. В работе проводилась оценка применимости ультразвуковых методов для контроля качества ПКП, в частности:

- обнаружение расслоений в ПКП;
- обнаружение расслоений между ПКП и подложкой;
- контроля толщины ПКП.

Апробация выбранных методов контроля проводилась на экспериментальных образцах размером 100 × 100 мм, а именно: свободная пленка многослойного ПКП, многослойное ПКП на металлической подложке, многослойное ПКП на подложке из полимерного композиционного материала, бездефектные и с искусственными дефектами. Моделирование дефектов производилось с помощью нанесения слоя ПКП без отвердителя.

На образце свободной пленки ПКП была измерена скорость распространения ультразвуковых колебаний в материале ПКП, которая составила 970 м/с. По времени прихода эхо-сигнала от границы раздела между ПКП и подложкой и между слоями ПКП (где возможно) с использованием полученного значения скорости распространения ультразвуковых колебаний в материале ПКП измерены толщины ПКП экспериментальных образцов. Из результатов измерений толщин ПКП экспериментальных образцов установлено, что толщина покрытий, измеренная с помощью оптико-акустического преобразователя, имеет меньшее отклонение от фактического значения величины, чем толщина покрытий, измеренная с помощью пьезоэлектрического преобразователя. Поэтому для задач толщинометрии эффективнее использовать ультразвуковой метод с оптико-акустической генерацией акустических колебаний.

При проведении экспериментальных исследований установлено, что выбранные методы обеспечивают выявление нарушения однородности структуры между слоями ПКП, ПКП и

подложкой. При этом информативными параметрами служат время прихода и амплитуда эхо-сигналов от границы раздела между ПКП и подложкой, донного сигнала от металлической подложки, сигнала от расслоения в ПКП. По времени прихода эхо-сигнала от границы раздела между ПКП и подложкой можно оценивать общую толщину ПКП. Высокая разрешающая способность ультразвукового метода с оптико-акустической генерацией акустических колебаний позволяет также оценивать толщину отдельных слоев ПКП.

## ПРИМЕНЕНИЕ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ЗАТВОРА ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ

© 2024 г. Роман Николаевич Александров<sup>1\*</sup>, И. И. Клюкин<sup>1\*\*</sup>, А. Р. Загретдинов<sup>1\*\*\*</sup>, Ш. Г. Зиганшин<sup>1\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – Казанский государственный энергетический университет, 420066 Казань, ул. Красносельская, д. 51

\* - [rgtv.wv@gmail.com](mailto:rgtv.wv@gmail.com); \*\* - [ilya.klyukinbkru.96@mail.ru](mailto:ilya.klyukinbkru.96@mail.ru);

\*\*\* - [azagretdinov@yandex.ru](mailto:azagretdinov@yandex.ru); \*\*\*\* - [shz2@list.ru](mailto:shz2@list.ru)

Критическим дефектом трубопроводной арматуры является нарушение герметичности ее затвора. Для оперативного выявления такого дефекта используется акустический метод [1, 2]. Он основан на регистрации акустических колебаний, возникающих при протечке жидкой или газообразной среды через неплотность. Как правило, негерметичность выявляют по увеличению амплитуды диагностического сигнала. Однако это нередко приводит к ошибке в определении состояния трубопроводной арматуры.

Известно, что небольшие протечки имеют турбулентный характер, даже если перепад давления невелик. Турбулентность всегда сопровождается флуктуациями давления и скорости, создаваемыми множеством завихрений разных масштабов. Степень стохастичности таких колебаний можно количественно оценить с применением методов фрактального анализа.

Целью работы является исследование возможности применения фрактального анализа для акустического контроля герметичности затвора трубопроводной арматуры.

Были проведены экспериментальные исследования. Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1.

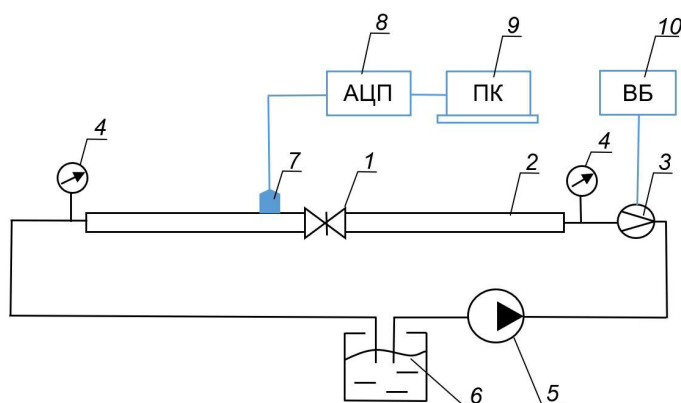


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – задвижка; 2 – трубопровод; 3 – электромагнитный расходомер «Взлет» ЭРСВ-410; 4 – манометр; 5 – насос; 6 – ёмкость с водой; 7 – датчик вибрационного ускорения АР2038Р-1000; 8 – аналого-цифровой преобразователь ZET-030; 9 – персональный компьютер с программным обеспечением; 10 – вычислительный блок «Взлет» ТСРВ-022.

При разной степени открытия затвора задвижки записывались акустические сигналы. С применением метода нормированного размаха (R/S-анализ) [3] рассчитана их фрактальная размерность. В табл. 1 представлено изменение фрактальной размерности акустических сигналов от перепада давления и расхода воды.

Таблица 1

**Результаты экспериментальных исследований**

Перепад давления на задвижке, бар	Расход воды, л/мин	Фрактальная размерность
0,1	22,0	1,07
0,4	20,0	1,27
0,6	18,7	1,35
1,1	14,0	1,48
1,6	10,5	1,54
1,9	5,3	1,67
2,0	0	1,05

Из табл. 1 видно, что при полностью открытой (расход 22 л/мин) и полностью закрытой (расход 0 л/мин) задвижке фрактальная размерность акустических сигналов находится на одном уровне. С прикрытием задвижки и уменьшением расхода протечки она увеличивается. Таким образом, фрактальная размерность акустических сигналов может служить индикатором нарушения герметичности затвора трубопроводной арматуры.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10045, <https://rscf.ru/project/22-79-10045/>.*

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Притужалов А.Д., Капитонов Н.Л., Воронцов А.В., Капитонов А.М. Контроль утечек в трубопроводной арматуре в процессе эксплуатации // Технологии нефти и газа. 2012. № 3 (80). С. 50—53.
2. Бабенков М.В., Копытов Д.В., Гуревич Д.В., Кузнецов М.Н. Экспериментальное исследование параметров акустической эмиссии течи в задвижках фонтанных арматур // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2015. № 11. С. 12—14.
3. Зиненко А.В. R/S анализ на фондовом рынке // Бизнес-информатика. 2012. № 3(21). С. 24—30.

# РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

© 2024 г. Валерий Валерьевич Малый<sup>1\*</sup>, М. С. Губин<sup>1\*\*</sup>, А. В. Федоров<sup>1\*\*\*</sup>,  
И. Ю. Кинжагулов<sup>1\*\*\*\*</sup>

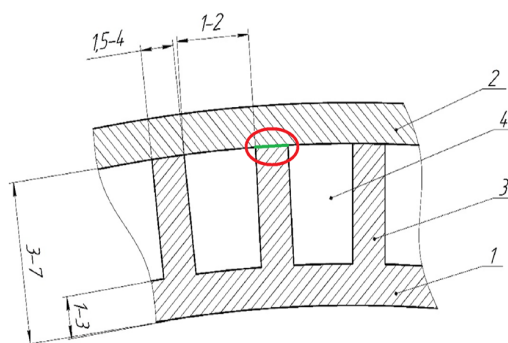
<sup>1</sup> – Университет ИТМО, 197101 Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49

\* - [banqvalera@mail.ru](mailto:banqvalera@mail.ru); \*\* - [gubin.maxim@mail.ru](mailto:gubin.maxim@mail.ru); \*\*\* - [afedor62@yandex.ru](mailto:afedor62@yandex.ru);

\*\*\*\* – [kinzhiki@mail.ru](mailto:kinzhiki@mail.ru)

**Цель работы.** Снижение трудоемкости, повышение оперативности и достоверности результатов ультразвукового контроля (УЗК) паяных соединений элементов теплообменных аппаратов (ТА) на основе автоматизации его технологии.

**Суть обсуждаемой проблемы.** Теплообменный аппарат (ТА) представляет собой многостеночную (в подавляющем большинстве двухстеночную) конструкцию сложной геометрической формы, стенки которой соединены при помощи пайки (паяных соединений). Внутренняя структура представлена на рис. 1.



1 – внутренняя стенка, 2 – внешняя стенка, 3 – ребро, 4 – канавка

Рис. 1. Внутренняя структура ПС ТА.

В процессе производства элементов ТА возможно возникновение дефектов в паяных соединениях (ПС), а именно, таких дефектов как «непропай» и «частичный непропай», что может повлиять на работу изделия в целом и, как правило, выходу его из строя.

Согласно ГОСТ 17325-79 [1], термины дефектов имеют следующие определения: непропай – дефект ПС, проявляющийся в полном незаполнении паяльного зазора припоем (рис. 2б); частичный непропай – дефект ПС, проявляющийся в частичном незаполнении паяльного зазора припоем (рис. 2в).

В настоящее время оценку паяных соединений определяют путём разрушающих (огневых, гидравлических, пневматических) испытаний. Обосновывается это тем, что существующие технологии УЗК ПС элементов ТА [2-4] имеют недостаточную достоверность результатов

контроля, т.к. геометрические размеры конкретного элемента ТА могут варьироваться в рамках определенного допуска. Варьирование геометрических размеров приводит к проблемам с точностью позиционирования измерительного преобразователя относительно внутренней поверхности элемента ТА, в результате чего возникают проблемы при интерпретации результатов. Эти проблемы приводят как к ошибкам первого рода (перебраковке), так и к ошибкам второго рода (недобраковке).

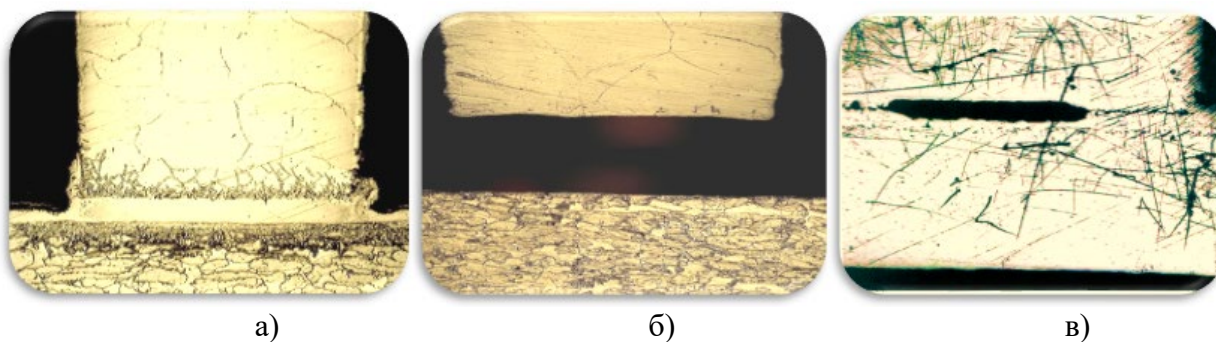


Рис. 2. ПС элементов ТА: а – бездефектное ПС; б – непропай; в – частичный непропай.

**Полученные результаты.** Для достижения указанной цели была разработана технология автоматизированного УЗК ПС элементов ТА, которая, в отличие от текущих технологий, позволяет учесть проблематику позиционирования измерительного преобразователя относительно внутренней поверхности элемента ТА, в том числе за счёт внедрения обратной связи между средством контроля и системой управления установки автоматизированного УЗК.

**Выводы.** Разработанная технология автоматизированного УЗК позволяет снизить трудоемкость, увеличить оперативность и достоверность результатов контроля паяных соединений элементов ТА.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 24715-81. Соединения паянные. Методы контроля качества: утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 29 апреля 1981 г. № 2182: дата введения 1983-01-01. М.: Издательство стандартов, 1981. 11 с.
2. Кинжагулов И.Ю. Модель термооптического возбуждения ультразвуковых волн в паяных тонкостенных изделиях // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 7. С. 39—44.
3. Сергеев Д.С., Астрединова Н.В. Методика контроля качества паяных соединений камер ЖРД с применением метода лазерно-ультразвуковой диагностики // Сборник трудов II Всероссийского конгресса молодых ученых. СПб: НИУ ИТМО, 2013. С. 67.
4. Костюхин А.С., Федоров А.В., Прохорович В.Е., Павлухин Е.А. Разработка и опытная апробация методики контроля паяных соединений жидкостных ракетных двигателей // Техно-технологические проблемы сервиса. 2021. № 1(55). С. 26—31.