



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



УрО РАН



ИМАШ УрО РАН

---

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

19-20 марта 2025 г.

---

Екатеринбург

2025

## **Физические методы неразрушающего контроля**

### **(Янусовские чтения)**

Тезисы докладов XXXVI Уральской конференции с международным участием

г. Екатеринбург, 2025

#### **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

|  |    |
|--|----|
| АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ТОЛЩИНОМЕТРИИ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПЕРЕМЕННОГО ДИАМЕТРА                            | 8  |
| В. А. Сясько   |    |
| ОЦЕНКА РАЗМЕРОВ ДЕФЕКТОВ ПРИ КОНТРОЛЕ ТРУБОПРОВОДОВ КРУТИЛЬНЫМИ ВОЛНАМИ  | 10 |
| В. Ю. Чертищев   |    |
| АНАЛИЗ ДАННЫХ ПО ПОВЕРКЕ ПРИБОРОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ: ЗАВИСИМОСТИ, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ  | 12 |
| С. Э. Попов  |    |
| ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СОЧЕТАНИЯ ДАННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ                            | 14 |
| Н. В. Крысько  |    |
| ВНУТРИТРУБНОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ ЭМА МЕТОДОМ  | 16 |
| В. В. Лопатин  |    |
| КОНТРОЛЬ ВЫСОКИХ ДОЗ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ОКСИДНЫХ КЕРАМИК  | 18 |
| С. В. Никифоров  |    |
| ВЫЯВЛЕНИЕ МЕЖКРИСТАЛЛИТНОЙ КОРРОЗИИ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ  | 20 |
| В. А. Барат  |    |
| ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ НЕЗАВИСИМОЙ ОЦЕНКИ КВАЛИФИКАЦИИ И ПОДГОТОВКИ ПЕРСОНАЛА В ОБЛАСТИ НК – ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОЧИХ МЕСТ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЭКЗАМЕНАЦИОННЫХ ОБРАЗЦОВ | 22 |
| Д. А. Аджибае  |    |
| ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПРИ РАБОТЕ АТТЕСТАЦИОННОГО ЦЕНТРА СО СТОРОННИМИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ-ЗАКАЗЧИКАМИ                              | 24 |
| М. П. Савичев  |    |
| ИМПУЛЬСНЫЙ ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОРУНДОВОЙ КЕРАМИКИ  | 26 |
| С. Е. Черных   |    |
| СНИЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСЕДНИХ ДЕТАЛЕЙ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ ПРОПАЯННОСТИ БОКОВЫХ СТенок ТОКОВЕДУЩИХ СОЕДИНЕНИЙ СТАТОРОВ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ            | 28 |
| Л. Х. Коган  |    |

|   |    |
|---|----|
| ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УЧАСТКОВ ТРУБОПРОВОДА В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ С ЦЕЛЬЮ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ     | 30 |
| О. Н. Василенко   |    |
| БЕСКОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТОСТРИКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ                                       | 32 |
| А. Н. Мушников  |    |
| К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА В ОБЛАСТИ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПОЛИЭТИЛЕНОВОГО ТРУБОПРОВОДА                       | 33 |
| К. И. Доронин   |    |
| ИДЕНТИФИКАЦИЯ КРН-ТРЕЩИН ПРИ ВНУТРИТРУБНОЙ МАГНИТНОЙ ДИАГНОСТИКЕ  | 35 |
| Ю. Л. Гобов   |    |
| ГЕЛИЕВЫЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СОСУДА ДЬЮАРА RMS-9 С СИСТЕМОЙ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ГАЗА                       | 37 |
| Д. С. Увин  |    |
| ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ КОРРОЗИОННЫХ ДЕФЕКТОВ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ОПТИМИЗАЦИИ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ | 39 |
| Л. В. Михайлов  |    |
| УПРОЩЕННОЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВО НЕОДНОЗНАЧНОСТИ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ МАГНИТОСТАТИКИ  | 41 |
| А. В. Никитин   |    |
| КРАЕВОЙ И РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТЫ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК С ПОМОЩЬЮ ПРИСТАВНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ                               | 43 |
| Д. Г. Ксенофонтов   |    |
| ПРИМЕНЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ ТЕРМООБРАБОТАННЫХ СТАЛЕЙ ПО СТАТИЧЕСКИМ МАГНИТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ | 45 |
| А. А. Беспрозванный   |    |
| МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ   | 47 |
| М. Ю. Федотов   |    |
| АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМОВ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ  | 49 |
| С. Г. Сандомирский  |    |
| АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ПОЛЯ РАССЕЯНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО ОБЪЕКТА В СЛАБОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ   | 51 |
| А. А. Неделько  |    |

|   |    |
|---|----|
| ПРИЧИНЫ ОТКАЗА РАБОЧИХ ЛОПАТОК ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА<br>Д. В. Новгородов   | 53 |
| КОМБИНИРОВАННОЕ КОРРОЗИОННОЕ ПОВРЕЖДЕНИЕ ГАЗОПРОВОДА<br>А. Ю. Сурков  | 55 |
| СПОСОБ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ<br>ПРЕССОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ МЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ<br>С. А. Бехер   | 57 |
| МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ<br>ЭКВИВАЛЕНТОВ УДАРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОМПОЗИТАХ ПРИ РАЗРАБОТКЕ<br>КОНТРОЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ В ТЕПЛОВОМ КОНТРОЛЕ<br>О. А. Ганина | 59 |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСЛАБЛЕНИЯ УЗЛОВ КРЕПЛЕНИЯ ОПОР<br>ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ИХ ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ<br>А. Н. Кожевников  | 61 |
| ВЛИЯНИЕ ДВУХОСНОГО РАСТЯЖЕНИЯ НА МАГНИТНЫЕ И<br>ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАСТАБИЛЬНОЙ АУСТЕНИТНОЙ<br>СТАЛИ<br>К. Д. Малыгина   | 64 |
| МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ПЛОТНОСТИ МАТЕРИАЛОВ<br>ПОКРЫТИЙ<br>М. В. Шипицына  | 66 |
| ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ТИПА НЕСПЛАВЛЕНИЙ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ<br>ДУГОВЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДА В РАЗДЕЛКЕ<br>Д. С. Бузорина  | 68 |
| БЕСКОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК<br>ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ<br>В. Н. Перов  | 70 |
| МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ОТОЖЖЕННОЙ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ, УПРУГО<br>ДЕФОРМИРОВАННОЙ ИЗГИБОМ<br>А. М. Матосян  | 72 |
| ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПСЕВДОИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ<br>КОРУНДА ДЛЯ СОЗДАНИЯ РАДИАЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ТОНКИХ СЛОЕВ<br>А. Д. Петракович                                      | 74 |
| ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ<br>ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО МАГНИТНОГО СТРУКТУРОСКОПА<br>Н. В. Гордеев  | 76 |

|  |    |
|--|----|
| МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 10X18H10T ПОСЛЕ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА ИЗГИБ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ | 78 |
| А. В. Кочнев   |    |
| ВЛИЯНИЕ МЕЛКИХ ЛОВУШЕК НА КИНЕТИКУ ОПТИЧЕСКИ СТИМУЛИРОВАННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ АНИОНОДЕФИЦИТНОГО КОРУНДА                       | 80 |
| А. И. Бояринцев  |    |
| ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИХРЕТОКОВОГО МЕТОДА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ТВЕРДОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННОГО ИЗДЕЛИЯ                  | 82 |
| А. Е. Коньгин  |    |
| ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ИСПЫТАНИЯ НА ИЗГИБ   | 84 |
| К. Е. Мызнов   |    |
| ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИОННОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ФАЗОВОГО СОСТАВА АУСТЕНИТНО-ФЕРРИТНЫХ НАПЛАВОК ИЗ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК                   | 86 |
| М. В. Лапин  |    |
| ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНИКИ СПЕКЛОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ УСТАЛОСТНОЙ ДЕГРАДАЦИИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16            | 87 |
| К. В. Наумов   |    |
| ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ                                      | 89 |
| А. А. Попков   |    |
| АНАЛИЗ ДИСПЕРСИИ ВОЛН ЛЭМБА ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ МАТЕРИАЛА ОБОЛОЧЕК ТВЭЛ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ    | 91 |
| А. В. Васильев   |    |
| ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДА ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ       | 93 |
| А. М. Горнов   |    |
| РАЗДЕЛЬНО-СОВМЕЩЕННЫЙ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДНОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ТЕЛА ТРУБЫ  | 95 |
| С. С. Ступин   |    |
| ПРЯМОЙ СОВМЕЩЕННЫЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ДО +450°С ДЛЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ    | 97 |
| В. И. Мальцев  |    |
| СИНТЕЗ ЗОНДИРУЮЩЕГО ПОЛЯ В ПРИБОРАХ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ  | 99 |
| Р. А. Дикий  |    |

|  |     |
|--|-----|
| КОНТРОЛЬ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ  | 101 |
| Е. С. Старосельская  |     |
| МЕТОДИКА СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ РАЗВИТИЯ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН РЕЛЬСОВ РАЗЛИЧНЫХ КАТЕГОРИЙ ТВЕРДОСТИ ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ                                     | 103 |
| С. П. Шляхтенков   |     |
| ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ПРИ КОНТРОЛЕ ЖЕСТКОСТИ УПРУГО-ДЕФОРМИРУЕМОГО ОСНОВАНИЯ   | 105 |
| В. С. Выплавень  |     |
| СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ К ВНУТРЕННИМ ДЕФЕКТАМ ПРОКАТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО И ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ | 107 |
| А. Л. Владыкин   |     |
| ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ СОЗДАНИИ ДАТЧИКОВ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ  | 109 |
| Т. С. Абрамова   |     |
| ОСОБЕННОСТИ НАСТРОЙКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЬНЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НАДВОДНЫХ СУДОВ                               | 111 |
| Н. В. Васильев   |     |
| УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ КАПРОЛОНА ЭХО-МЕТОДОМ  | 113 |
| П. С. Корепанов  |     |
| ОСОБЕННОСТИ МАНГИТОАНИЗОТРОПНОГО ЭФФЕКТА ПРИ ДВУХОСНОМ НАГРУЖЕНИИ СТАЛИ  | 115 |
| Р. А. Соколов  |     |

# АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ТОЛЩИНОМЕТРИИ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПЕРЕМЕННОГО ДИАМЕТРА

© 2025 г. Владимир Александрович Сясько<sup>1\*</sup>, А.Е. Ивкин<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup> – ООО «КОНСТАНТА», 198097, Санкт-Петербург, Огородный переулок, д. 21

\* - 9334343@gmail.com; \*\* - ivkin@constanta.ru

Рассмотрены принципы построения и практическая реализация серии многоканальных автоматизированных систем контроля толщины теплозащитных покрытий на внутренней поверхности цилиндрических изделий переменного диаметра длиной до 1,96 м. Толщина контролируемых покрытий составляет от 0,3 до 2,9 мм, переменный диаметр в зависимости от конструктивного исполнения изделия может составлять от 58 до 210 мм (рис. 1). Количество измерительных каналов – до 8 (рис. 2). Для измерения толщины покрытий используются специализированные интеллектуальные магнитоиндукционные измерительные преобразователи, обеспечивающие установленные метрологические характеристики при непрерывном цикле работы в цеховых условиях.



Рис. 1. Внешний вид многоканальных автоматизированных систем контроля толщины теплозащитных покрытий на внутренней поверхности цилиндрических изделий для двух исполнений



Рис. 2. Конструкция восьмиканального модуля измерительных преобразователей

Приводятся технические и метрологические характеристики системы, алгоритмы работы измерительных преобразователей, адекватные виртуальные модели, используемые при разработке и эксплуатации систем, методы обработки измерительной информации, хранения и представления результатов.

Подробно освещены вопросы метрологического обеспечения измерительных систем и используемых моделей, а также подходы при сертификации оборудования в целом.

## ОЦЕНКА РАЗМЕРОВ ДЕФЕКТОВ ПРИ КОНТРОЛЕ ТРУБОПРОВОДОВ КРУТИЛЬНЫМИ ВОЛНАМИ

© 2025 г. **Василий Юрьевич Чертищев<sup>1\*</sup>, П.В. Соломенчук<sup>2\*\*</sup>**

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

<sup>2</sup> – ООО «Константа», 198097 Санкт-Петербург, Огородный переулок, д. 21

\* - [cvu@echoplus.ru](mailto:cvu@echoplus.ru); \*\* - [pavel257@mail.ru](mailto:pavel257@mail.ru)

Выявление и прогнозирование развития дефектов в протяженных, труднодоступных для других способов контроля объектах, например, дорожных подземных, водных и воздушных переходах и т.п., является сложной и не всегда решаемой задачей. Нормальные волны широко используются для обследования трубопроводов большой протяженности благодаря их характеристикам распространения с низким затуханием. Волноводный контроль позволяет проводить контроль труб без сканирования и использует методику прозвучивания, где низкочастотный импульс запускается с поверхности длинномерного объекта, распространяется по телу и, отразившись от дефекта или особенности геометрии, возвращается обратно и регистрируется. Эхо-сигнал, отраженный от дефекта, меняется не только в зависимости от его глубины, но и от его длины с учетом частоты контроля. Оценка размеров дефектов при контроле крутильными волнами является сложной задачей [1]. Помимо этого, в стадии разработки и внедрения по всему миру находится несколько систем мониторинга на основе контроля крутильных волн [2, 3]. Из-за высокой зашумленности и изменения скорости звука и влияния продукта записанные периодические сигналы могут существенно отличаться. Приведены результаты изысканий, направленных на создание подхода к точному измерению оцениваемых размеров дефектов с автоматической калибровкой к единому уровню величин.

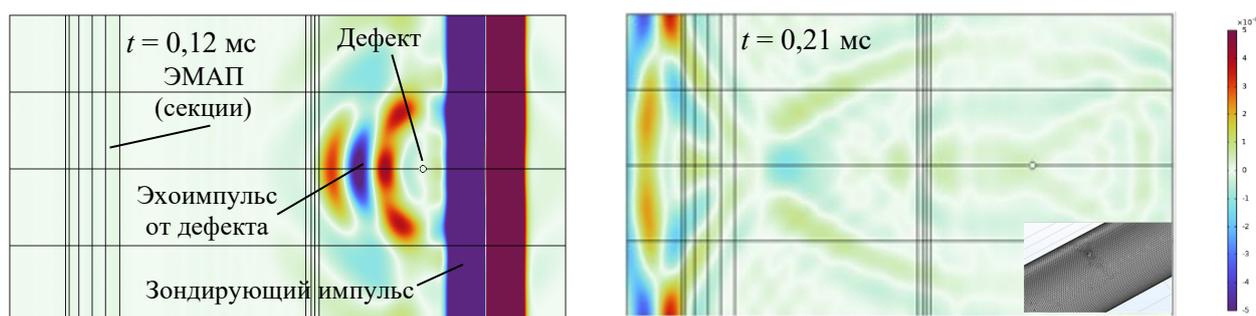


Рис. 1. Развертка внешней поверхности трубы с цветовой картой крутильной компоненты смещений при отражении от сквозного отверстия диаметром 6 мм

Анализ процесса распространения эхо-импульса частотой 64 кГц от дефекта в трубе диаметром 89 мм с толщиной стенки 4 мм на основе конечно-элементного моделирования (Рис. 1) показал, что его фронт является цилиндрическим (расходящимся), но стремится к плоскому с увеличением расстояния от дефекта. Получены цветные карты распределения смещений

крутильных волн и всех компонентов смещений в разные моменты времени при отражении от сквозного круглого отверстия.

Для расчета амплитуды сигналов, отраженных от дефекта, используют аналитическую модель, базирующуюся на известных зависимостях прохождения акустического импульса через границу с иными акустическими свойствами. Расчет аналитической модели проводится с использованием методов спектрального анализа и реализуется в средах типа MathCAD. Для нескольких типов отражателей выполнено сравнение результатов аналитической модели с результатами конечно-элементной модели в программной среде COMSOL (с учетом связанных явлений и мультифизики). На рис. 2 приведен пример данных для отражателя в виде кольцевой проточки. Предложена методика частотнозависимой оценки размеров дефекта с калибровкой по опорному отражателю: площади в процентах от площади поперечного сечения и осевой протяженности. Выполнено успешное экспериментальное опробование предложенной методики для труб диаметрами 89 и 108 мм с искусственными дефектами в виде сегментных пазов и сверлений. Предложены направления дальнейших изысканий.

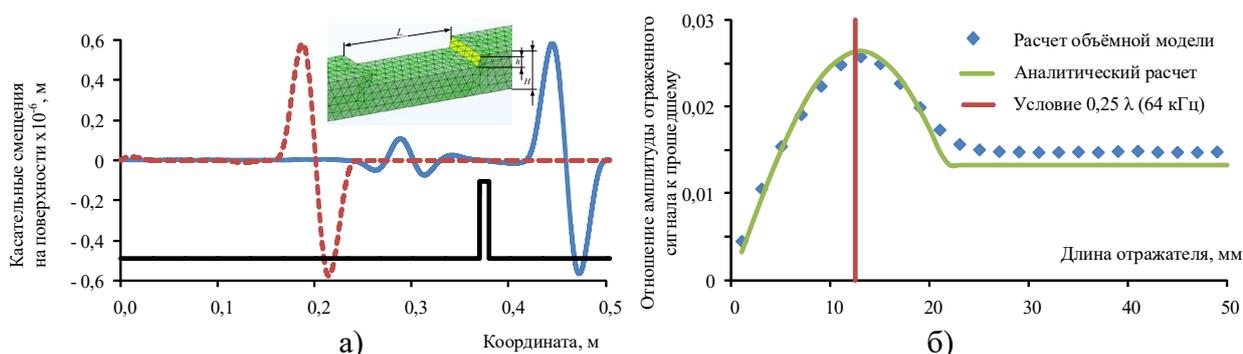


Рис. 2. Амплитуды сигналов, отраженных от дефекта: а) касательные смещения при движении зондирующего импульса и сигнал, отраженный и прошедший через дефект; б) сравнение результатов аналитической и конечно-элементной моделей

## ЛИТЕРАТУРА

1. Муравьева О.В., Муравьев В.В., Стрижак В.А., Мурашов С.А., Пряхин А.В. Акустический волноводный контроль линейно-протяженных объектов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. 234 с.
2. Славин А.В., Далин М.А., Диков И.А., Бойчук А.С., Чертищев В.Ю. Современные тенденции развития акустических методов неразрушающего контроля в авиационной отрасли (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 12(106). С. 96–106.
3. Yi-Gon Kim, Hong-Sik Moon, Kyung-Jo Park, Jeong-Ki Lee. Generating and detecting torsional guided waves using magnetostrictive sensors of crossed coils // NDT&E International. 2011. V. 44. No. 2. P. 145–151.

## АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИБОРОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

© 2025 г. Сергей Владимирович Скрынников<sup>1</sup>, С.Э. Попов<sup>1\*</sup>, А.С. Дементьев<sup>1\*\*</sup>,  
Д.В. Комаров<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – АО «Газпром диагностика», 196158 Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д. 40,  
корпус 4, литер Д, помещение С3073

\* - [s.popov@diagnostika.gazprom.ru](mailto:s.popov@diagnostika.gazprom.ru); \*\* - [a.dementev@diagnostika.gazprom.ru](mailto:a.dementev@diagnostika.gazprom.ru);

\*\*\* - [d.komarov@diagnostika.gazprom.ru](mailto:d.komarov@diagnostika.gazprom.ru)

Приборы неразрушающего контроля, такие как ультразвуковые, магнитные, вихретоковые и другие, широко применяются в диагностических обследованиях для обеспечения безопасности и надежности промышленных объектов. Важнейшим аспектом их эксплуатации является метрологическое обеспечение, включающее первичную и периодическую поверку. В соответствии с Федеральным законом № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» от 26.06.2008, все средства измерений, включая приборы неразрушающего контроля, подлежат обязательной первичной и периодической поверке. Результаты поверок средств измерений регистрируются в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений, а именно в подсистеме «АРШИН» ФГИС Росстандарта.

За более чем 15 лет в базе данных подсистемы «АРШИН» накоплен значительный объем информации о распространении и применении приборов неразрушающего контроля на территории Российской Федерации. В рамках исследования группой авторов было проанализировано более 190 000 записей, содержащих данные о поверке дефектоскопов. На основании проведенного анализа были получены данные о среднем сроке службы приборов, частоте их поверок и максимальном времени эксплуатации.

Анализ данных показал, что большинство приборов проходит процедуру поверки только один раз, что свидетельствует об их эксплуатации исключительно с первичной заводской поверкой (рис. 1).

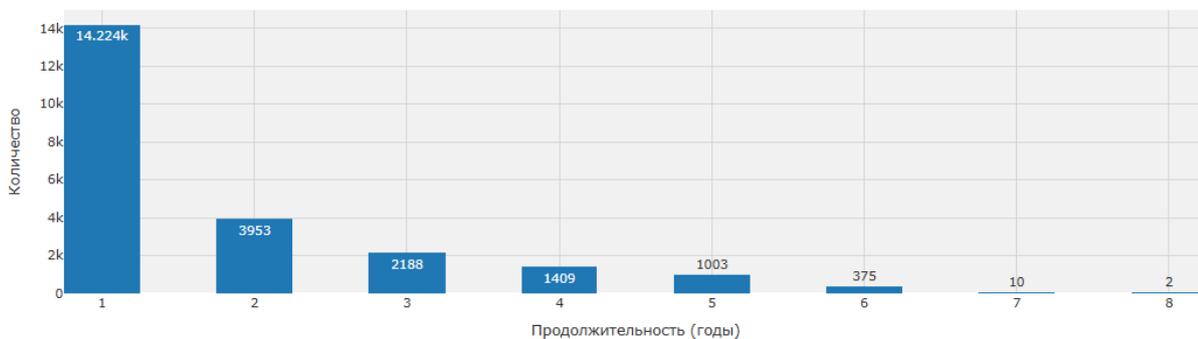


Рис. 1. Распределение количества дефектоскопов по продолжительности действия результатов поверки

При исключении приборов, прошедших поверку только один раз, средний срок службы дефектоскопов составляет 3 года (рис. 2). Данный показатель варьируется в зависимости от типа и модификации прибора. Так, для магнитопорошковых дефектоскопов средний срок службы составил 3,8 года, а для оптических — 2,2 года. Максимальный зафиксированный срок эксплуатации дефектоскопа достиг 8 лет, что подчеркивает значительный разброс в долговечности приборов.

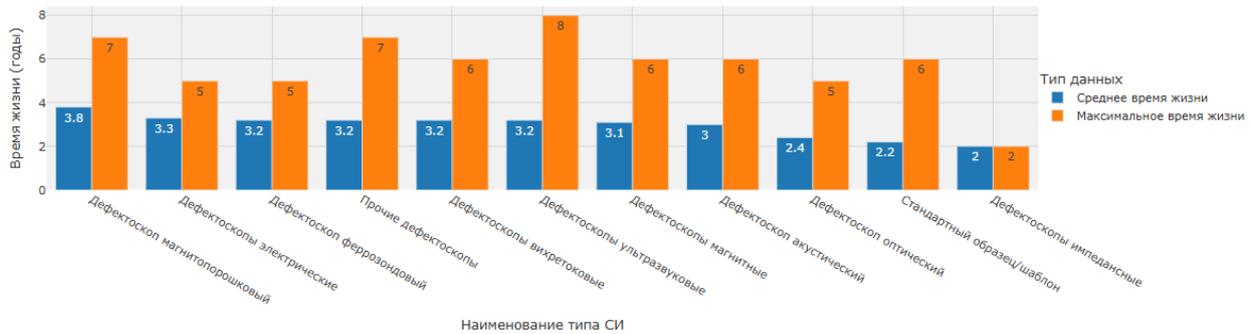


Рис. 2. Средний и максимальный срок службы дефектоскопов в зависимости от типа

# ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СОЧЕТАНИЯ ДАННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

© 2025 г. Николай Владимирович Крысько<sup>1,2\*</sup>, А.Г. Кусый<sup>1,2\*\*</sup>

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

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

\* - kryskonv@bmstu.ru; \*\* - andrei.k.166@mail.ru

**Цель работы.** Определить основные принципы сочетания данных физических методов неразрушающего контроля (НК) магистральных трубопроводов, разработать подходы к их интеграции для прогнозирования типа и параметров дефектов и оценить возможности практической реализации данных методов. Провести анализ влияния отдельных информационных параметров, полученных различными методами НК, на прогнозирование типа и параметров дефектов. Произвести обучение моделей совместного анализа данных и оценить их эффективность по подходящим метрикам.

**Суть обсуждаемой проблемы.** Магистральные трубопроводы являются основным средством транспортировки углеводородов и эксплуатируются в сложных внешних условиях, что приводит к развитию дефектов, связанных с коррозией, усталостным разрушением, механическими повреждениями и деградацией сварных соединений. Для обеспечения их безопасной и длительной эксплуатации необходимо применение различных методов неразрушающего контроля, таких как ультразвуковой, радиографический, вихретоковый, магнитопорошковый и визуально-измерительный контроль [1]. Однако отдельное применение каждого из этих методов может приводить к неоднозначной интерпретации результатов, особенно в случаях наличия дефектов, имеющих сложные геометрические особенности. Например, ультразвуковой контроль эффективен для выявления внутренних дефектов, но может показывать ложные срабатывания из-за наличия отражателей, обусловленных геометрическими особенностями сварных соединений. Радиографический контроль позволяет визуализировать внутренние дефекты в сварных швах, но ограничен в выявлении поверхностных плоскостных коррозионных повреждений. Вихретоковый метод чувствителен к трещинам и поверхностным дефектам, но имеет ограничения при анализе внутренних повреждений [2]. В результате возникает необходимость сочетания данных различных методов неразрушающего контроля, что позволяет компенсировать их индивидуальные ограничения и обеспечить более достоверную оценку технического состояния трубопровода. Сочетание данных является процессом объединения различных данных для получения более качественной информации, чем информация от одного источника [3]. Для задач оценки качества магистральных трубопроводов необходимо создание 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.** В рамках исследования были определены ключевые информационные параметры, получаемые при неразрушающем контроле НК сварных швов и основного металла магистральных трубопроводов. Установлена неоднозначность классификации и оценки характеристик дефектов, обусловленная различными факторами, влияющими на результаты контроля. Проведен анализ степени влияния информационных параметров методов НК на точность классификации и оценку дефектов. Разработаны модели совместного анализа результатов НК, позволяющие прогнозировать тип и параметры дефектов.

**Выводы.** Определены информационные параметры различных методов НК, которые могут быть использованы в качестве входных данных для моделей прогнозирования типа и параметров дефектов. Построены модели сочетания данных методов НК при контроле основного металла и сварных швов магистральных трубопроводов, оценена их работоспособность и определена оптимальная модель.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. СТО Газпром 15-1.3-004-2019. Сварка и неразрушающий контроль сварных соединений. Неразрушающие методы контроля качества сварных соединений промышленных и магистральных газопроводов.
2. *Алешин Н.П.* Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений: учебное пособие. 2е изд., перераб. и доп. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 576 с.
3. *Haghighat M., Abdel-Mottaleb M., Alhalabi W.* Discriminant Correlation Analysis: Real-Time Feature Level Fusion for Multimodal Biometric Recognition // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. 2016. V. 11. P. 1984–1996.

## ВНУТРИТРУБНОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ ЭМА МЕТОДОМ

© 2025 г. Владислав Викторович Лопатин<sup>1\*</sup>, М.А. Шашков<sup>1\*\*</sup>,  
А.Е. Кусков<sup>1\*\*\*</sup>, А.Н. Кукушкин<sup>1\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – Общество с ограниченной ответственностью «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР  
«ВНУТРИТРУБНАЯ ДИАГНОСТИКА», 623700 Свердловская область,  
г. Березовский, Западная промзона, д. 14

\* - v.lopatin@npcvtd.ru; \*\* - m.shashkov@npcvtd.ru; \*\*\* - a.kuskov@npcvtd.ru;  
\*\*\*\* - a.kukushkin@npcvtd.ru

ООО "НПЦ "ВТД" является передовой компанией полного цикла разработки, производства и эксплуатации дефектоскопов поршневого типа, предназначенных для внутритрубного технического диагностирования магистральных трубопроводов в потоке перекачиваемого продукта без вывода объекта контроля из эксплуатации и снижения режимов перекачки.

В 2022 году на предприятии завершён многолетний цикл разработки и производства инновационного дефектоскопа, основанного на электромагнитно-акустическом (ЭМА) методе. Успешное завершение проекта подтверждено протоколом натуральных квалификационных испытаний на объекте ПАО “Газпром” – участке действующего магистрального газопровода DN1400 и на специализированном протяжном испытательном трубном стенде с естественными и искусственными дефектами, в том числе с дефектами наружного изоляционного защитного покрытия. В настоящий момент закончен этап опытно-промышленной эксплуатации, продиагностировано более 1000 км трубы DN1400, завершён этап верификационных наружных исследований обнаруженных дефектов в шурфах, в 2025 году запланирован первый в России коммерческий пропуск диагностического оборудования подобного типа на объекте ПАО “Газпром”.

Десятилетия для целей внутритрубной диагностики магистральных газопроводов использовался магнитный метод неразрушающего контроля, основанный на фиксации магнитных потоков рассеяния. Благодаря успешной реализации в России в конце 90-х – начале 2000-х крупного диагностического проекта периодического внутритрубного контроля, удалось успешно купировать лавинный рост аварийности стареющих магистральных газопроводов.

Однако за годы эксплуатации были выявлены ограничения магнитного метода, которые не позволяют сегодня гарантировать безаварийную работу газопроводной системы – прежде всего это недостаточная чувствительность метода к трещинам КРН и трещинам в заводских и монтажных кольцевых швах.

ЭМА внутритрубные инспекционные устройства не отменяют существующие, а дополняют наборы диагностических информационных слоёв. Во время проведения

комбинированной магнитоакустической диагностики было выявлено более 1500 трещин и трещиноподобных дефектов, что в среднем в 20 раз больше, чем при проведении традиционного контроля. Средняя глубина выявленных дефектов равнялась 25 % толщины стенки трубы. Также значительно увеличилось количество дефектов высшей категории опасности – трещин по линии сплавления продольных сварных швов.

Помимо значительных преимуществ в части выявления трещин и плоскостных трещиноподобных дефектов, ЭМА дефектоскоп оснащён многодатчиковой толщиномерической системой измерительного класса, которая позволяет определять остаточную толщину стенки трубы с применением ЭХО метода. Также прибор имеет независимую диагностическую систему для контроля качества адгезии защитного изоляционного покрытия и определения типа его конструкции.

Все вышеописанные диагностические ЭМА датчиковые подсистемы, а также магнитная датчиковая система сверхвысокого разрешения скомпонованы в едином комбинированном магнитоакустическом дефектоскопе, поэтому транспортная нагрузка и количество запусков внутритрубных инспекционных приборов остаются неизменными, что особенно важно для организаций, эксплуатирующих магистральный трубопровод. Остались неизменными также и требования к скорости диагностики и качеству очистки внутренней полости трубы.

На основании вышеперечисленных качеств инновационного ЭМА дефектоскопа можно ожидать, что 2025 год войдёт в историю развития средств диагностирования как год начала масштабной реконструкции основного оборудования для внутритрубного контроля магистральных газопроводов, развитию и расширению нормативных требований к ним.

## КОНТРОЛЬ ВЫСОКИХ ДОЗ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ОКСИДНЫХ КЕРАМИК

© 2025 г. Сергей Владимирович Никифоров<sup>1\*</sup>, Д.В. Ананченко<sup>1\*\*</sup>, Т.В. Штанг<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – Уральский федеральный университет, 620002 Екатеринбург, улица Мира, д. 19

\* - s.v.nikiforov@urfu.ru; \*\* - d.v.ananchenko@urfu.ru; \*\*\* - t.v.shtang@urfu.ru

Высокие дозы ионизирующих излучений (более 10 Гр) в настоящее время широко используются в радиационных технологиях и научных исследованиях для стерилизации пищевых продуктов и медицинских инструментов, очистки сточных вод, в брахитерапии, при модификации свойств композитных материалов, металлов и сплавов, а также для спектроскопии собственных и примесных дефектов в полупроводниковых и диэлектрических материалах. Для контроля параметров таких излучений перспективными являются люминесцентные детекторы на основе наноструктурных материалов из-за их повышенной радиационной стойкости [1]. Большинство коммерческих люминесцентных детекторов характеризуются верхним пределом диапазона регистрируемых доз до 1-100 Гр. Поэтому поиск и исследование новых люминесцирующих материалов, пригодных для дозиметрии высокоинтенсивных радиационных полей, обеспечивающих поглощенные дозы 1 кГр и более, представляет собой актуальную задачу [2-4].

Целью данной работы является синтез и исследование люминесцентных и дозиметрических свойств облученных высокими дозами ультрадисперсных керамик на основе широкозонных оксидных диэлектриков.

Исследованы термолюминесцентные (ТЛ) и дозиметрические свойства ультрадисперсных керамик на основе оксидов алюминия и циркония, облученных высокодозным импульсным электронным пучком (130 кэВ, 1,5 кГр на один импульс). Для синтеза керамик с различным размером кристаллитов использовалось спекание компактов, изготовленных из нанопорошков, на воздухе в электрической печи при  $T=700-1700$  °С, а также их облучение высокоэнергетическими электронами (1,4 МэВ) с высокой плотностью мощности (20-30 кВт/см<sup>2</sup>) [5]. Методами сканирующей электронной микроскопии и рентгенофлуоресцентного анализа установлено, что высокотемпературный отжиг не влияет на фазовый состав, однако приводит к существенному росту размеров кристаллитов. В керамиках, синтезированных электронно-лучевым методом, размер наночастиц практически не отличается от размера кристаллитов в исходном нанопорошке. Установлено, что отжиг керамик при  $T>1000$  °С приводит к существенному увеличению интенсивности ТЛ пиков. Максимальным ТЛ откликом обладают керамики, полученные электронно-лучевым методом, что связано с образованием радиационно-индуцированных центров захвата и свечения при синтезе. С помощью измерения импульсной

катодолюминесценции установлен спектральный диапазон свечения исследуемых образцов. В работе также определены значения кинетических параметров ловушек, ответственных за ТЛ пики. Анализ дозовых зависимостей ТЛ облученных керамик  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{ZrO}_2$  выявил их преимущественно сублинейный характер. Для керамик на основе оксида алюминия, в отличие от монокристаллической модификации, установлено наличие аномального ТЛ фединга, связанного с наличием локализованных переходов носителей заряда, характерных для наноструктурных материалов. При этом величина фединга увеличивается с ростом размера кристаллитов. Наличие интенсивного изолированного пика ТЛ и сублинейный характер большинства дозовых зависимостей доказывают перспективность синтезированных в настоящей работе оксидных керамик для измерения высоких доз импульсных электронных пучков (единицы-десятки кГр). При этом для керамик на основе оксида алюминия требуется коррекция ТЛ отклика на величину фединга.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Kortov V.S.* Nanophosphors and outlooks for their use in ionizing radiation detection // *Radiation Measurements*. 2010. V. 45. P. 512-515.
2. *Yukihara E.G., Bos A.J.J., Bilski P., McKeever S.W.S.* The quest for new thermoluminescence and optically stimulated luminescence materials: Needs, strategies and pitfalls // *Radiation Measurements*. 2022. V. 158. P. 106846.
3. *Bilski P.P., Obryk B., Gieszczyk W., Baran P.* Position of LiF: Mg, Cu, P TL peak as an alternative method for ultra-high-dose dosimetry // *Radiation Measurements*. 2020. V. 139. P. 106486.
4. *Tang H., Lin L., Zhang C., Tang Q.* High-sensitivity and wide-linear-range thermoluminescence dosimeter LiMgPO<sub>4</sub>: Tm, Tb, B for detecting high-dose radiation // *Inorganic Chemistry*. 2019. V. 58. No. 15. P. 9698-9705.
5. *Lisitsyn V., Mussakhanov D., Tulegenova A., Kaneva E., Lisitsyna L., Golkovski M., Zhunusbekov A.* The Optimization of Radiation Synthesis Modes for YAG:Ce Ceramics // *Materials*. 2023. V. 16. P. 3158.

## ВЫЯВЛЕНИЕ МЕЖКРИСТАЛЛИТНОЙ КОРРОЗИИ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

© 2025 г. Вера Александровна Барат<sup>1\*</sup>, А.Ю. Марченков<sup>1\*\*</sup>, А.А. Панькина<sup>1</sup>,  
Н.В. Лаврик<sup>1</sup>, Е.А. Лепшеев<sup>1,2</sup>, С.В. Ушанов<sup>2</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

Межкристаллитная коррозия (МКК) — один из наиболее опасных видов коррозионного разрушения аустенитных сталей. Коррозионный процесс вызывает охрупчивание и разрушение границ зерен, при этом сталь полностью теряет механическую прочность и разрушается даже при незначительных нагрузках. Поскольку на ранних этапах развития МКК представляет собой совокупность трещиноподобных дефектов микроскопического уровня, актуальным является исследование возможности применения метода акустической эмиссии (АЭ), обладающего высокой чувствительностью к выявлению дефектов данного типа. Существует ряд фундаментальных исследований [1, 2], показывающих, что МКК является источником АЭ и могут быть выявлена по специфичным параметрам диагностических сигналов, что создает предпосылки для разработки промышленных методик выявления МКК методом АЭ.

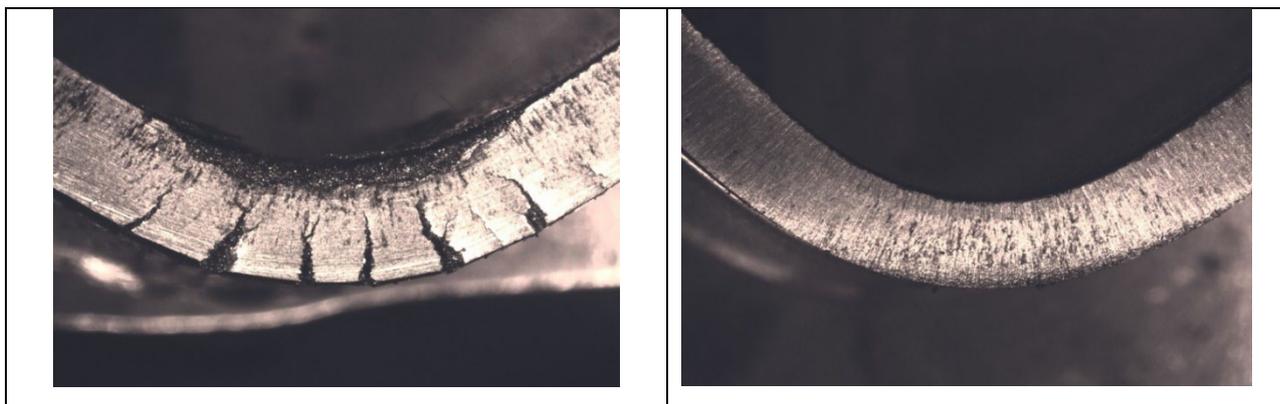


Рис. 1. Фотографии образцов стали 12Х18Н9 после испытаний на стойкость к межкристаллитной коррозии (увеличение 7,5х): при температуре 600 °С (а) при 700 °С (б)

В рамках данной работы рассматривается выявление МКК в нестабилизированной аустенитной стали 12Х18Н9. Для проведения экспериментального исследования были изготовлены образцы прямоугольной формы для испытаний на статический трехточечный изгиб. Образцы были подвергнуты термообработке, имитирующей процесс сенсibilизации, термообработка проводилась в шести режимах – при температурах 600, 650 и 700 °С при выдержках 25 и 100 часов. Затем образцы были испытаны на стойкость к МКК – в соответствии с ГОСТ 6032-2017 с испытанием по методу АМУ и последующим нагружением на статический изгиб с применением метода АЭ. Наличие МКК определялось по возникновению сетки трещин при изгибе образцов. При различных режимах термообработки наблюдалась различная

выраженность МКК. Наибольшее количество развитых стресс-коррозионных трещин наблюдалось на образцах с термообработкой при температуре 600 °С (рис. 1а), на образцах, выдержанных при температуре 700 °С, мелкая сетка трещин выявлялась только с помощью лупы с увеличением 7,5х (рис. 1б).

На рис. 2 показаны АЭ параметры (суммарный счет и амплитуды импульсов АЭ) двух образцов стали 12Х18Н9, рис. 2а соответствует испытаниям на изгиб бездефектного образца, не прошедшего термообработку и испытание по методу АМУ, а рис. 2б – образцу, прошедшему термообработку при 700 °С и содержащему незначительные коррозионные повреждения (фото рис. 1б).

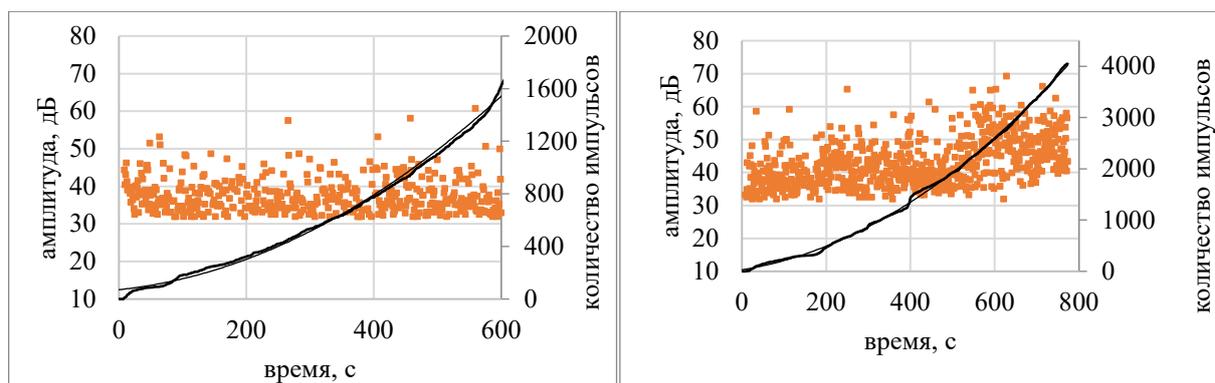


Рис. 2. Данные АЭ для бездефектного образца (а) для образца с МКК (б)

Как видно из рисунка, присутствие даже незначительных коррозионных повреждений приводит к повышению активности и уровня амплитуд импульсов АЭ, для образца, содержащего МКК, количество импульсов АЭ увеличилось приблизительно в 3 раза, а среднее значение амплитуд импульсов АЭ возросло на 10 дБ. Кроме того, для образца с МКК наблюдается возрастающий тренд значений амплитуд импульсов АЭ, соответствующий развитию стресс-коррозионных трещин.

*Исследование выполнено в рамках проекта «Разработка методики выявления процессов сенсibilизации и образования межкристаллитной коррозии в аустенитных сталях методом акустической эмиссии» (ПНИ-24/26-34) при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024-2026 гг.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Takemoto M. Grain Boundary Characteristics and Acoustic Emission in the Intergranular Stress Corrosion Cracking // *Zairyo to Kankyo*. 2020. V. 69. P. 112–130.
2. Merson E., Vinogradov A., Merson D.L. Application of acoustic emission method for investigation of hydrogen embrittlement mechanism in the low-carbon steel // *Journal of Alloys and Compounds*. 2015. V. 645. Suppl. 1. P. S460–S463.

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ  
НЕЗАВИСИМОЙ ОЦЕНКИ КВАЛИФИКАЦИИ И ПОДГОТОВКИ  
ПЕРСОНАЛА В ОБЛАСТИ НК – ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОЧИХ МЕСТ И  
ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЭКЗАМЕНАЦИОННЫХ ОБРАЗЦОВ**

© 2025 г. Аджибае Даниэль Адебайо<sup>1\*</sup>, М.П. Савичев<sup>1,2\*\*</sup>, В.В. Атрощенко<sup>1,2\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – ООО “ГАЦ РБ”, 450001 Уфа, ул. Пархоменко, д. 155/1

<sup>2</sup> – ФГБОУ ВО “УУНУТ”, 450008 Уфа, ул. К. Маркса, д. 12

\* *danno23@mail.ru*; \*\* - *savichevmax@mail.ru*; \*\*\* - *91250@mail.ru*

**Целью данной работы** является обобщение требований к материально-технической базе центра, занимающегося подготовкой, аттестацией и оценкой квалификации специалистов в области неразрушающего контроля (НК). Рассмотрены требования нормативных документов к оборудованию и экзаменационным образцам (ЭО), а также собственный опыт по организации рабочих мест и изготовлению ЭО.

Обучение, оценка квалификации и аттестация специалистов НК регламентируются профессиональными стандартами [3] и нормативными документами [2, 4]. Для каждого метода НК регламентирован перечень оборудования, настроечных и стандартных образцов [2], требования к размерам и количеству дефектов в ЭО [5].

Опыт изготовления наружных дефектов для визуального и измерительного контроля (ВИК), внедренных дефектов для магнитного (МК), ультразвукового (УЗК) и радиационного (РК) методов контроля, поверхностных трещин с малым раскрытием для капиллярного (ПВК) и вихретокового (ВК) методов и течеискания (ПВТ) подробно описан в [1]. При изготовлении ЭО для РК хорошо зарекомендовала себя цифровая радиография.

Для вибродиагностического контроля необходим специальный вибростенд и переносной анализатор вибрации. В качестве ЭО применяются сменные диски с резьбовыми отверстиями под балансировочные болты.

Для акустико-эмиссионного контроля (АЭ) применяется диагностический комплекс с 4 пьезоакустическими преобразователями (ПАЭ) и имитатором акустико-эмиссионных сигналов. Одним из ЭО служит герметичный сосуд в виде трубы с двумя вваренными штуцерами. В первый штуцер установлено реле давления, соединенное с эксцентриковым вибромотором, а также винт для имитации утечки среды. Через второй штуцер осуществлено подключение к компрессору для имитации пневматических испытаний. При достижении установленного экзаменатором давления срабатывает эксцентриковый мотор и появляются сигналы акустической эмиссии 3 и 4 типов. Другим ЭО служит сварная пластина, имитирующая АЭ контроль стального резервуара. К обратной стороне пластины на магнитной основе устанавливается микросхема, содержащая микрофон и динамик. На микросхему записана серия звуков, полученных имитатором Су-Нильсона.

Рабочее место для электрического контроля включает: дефектоскоп электроискровой с веерным электродом, кольцевые электроды  $\varnothing 159$  мм и роликовые опоры для поворота ЭО, представляющих из себя трубные катушки  $\varnothing 159$  мм с ленточно-полимерным и экструдированным покрытиями.

Для обучения механизированному УЗК (в том числе методами ФАР, TOFD), изготовлен роликовый стенд с подводом и сбором контактной жидкости. В качестве ОЭ используются трубы с продольными и поперечными пропилами изнутри трубы в корне и зоне сплавления, а также предварительно заложенными в разделку кромок вольфрамовыми электродами. Также организован участок УЗК сварных соединений полиэтиленовых газопроводов хордовыми датчиками. Необходимые ЭО выполняются из полиэтилена марки ПЭ-100 путем предварительного засверливания отверстий в стыкуемых кромках и закладывания в них посторонних включений.

Рабочее место для ПВК по 2 классу ГОСТ 18442–80 выполнено в виде стола и вытяжного покрасочного шкафа. Для проведения ПВК по 1 классу (люминесцентного контроля) организована механизированная линия. Для периодической очистки ЭО и настроечных образцов применяется ультразвуковая ванна с подогревом.

Рабочее место для МК содержит оборудование для разных способов намагничивания: постоянный магнит, электромагниты постоянного и переменного поля, катушки намагничивания, магнитный дефектоскоп с соленоидами, кабелем, выносными и магнитными наконечниками. Для расчета режима намагничивания применяется структуроскоп-коэрцитиметр, магнитометр, тестовый образец по Бертольдцу.

Приведенные методики создания экзаменационных образцов и организации рабочих мест могут быть использованы центрами, занимающихся подготовкой, аттестацией и оценкой квалификации специалистов в области НК.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *А.П. Тайметов, М.П. Савичев, Д.А. Аджибаев.* Разработка технологии изготовления универсальных экзаменационных образцов для обучения и аттестации специалистов неразрушающего контроля в нефтегазовой отрасли // Структура. Контроль. Диагностика. Ресурс: Сборник научных трудов, посвященный 75-летию доктора технических наук, профессора А.Н. Смирнова / Под общей редакцией Н.В. Абабкова. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2022. С. 285–297.
2. СНК ОПО РОНКТД – 04–2024 «Система неразрушающего контроля на опасных производственных объектах. Требования к аттестационным центрам».
3. Профстандарт 40.108. Специалист по неразрушающему контролю.
4. ГОСТ Р ИСО 9712-2023. Контроль неразрушающий. Квалификация и сертификация персонала.
5. ГОСТ Р 58713-2019/ISO/TS22809:2007. Контроль неразрушающий. Несплошности в образцах, используемых в квалификационных экзаменах.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПРИ РАБОТЕ АТТЕСТАЦИОННОГО ЦЕНТРА СО СТОРОННИМИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ-ЗАКАЗЧИКАМИ

© 2025 г. Максим Павлович Савичев<sup>1,2\*</sup>, Д.А. Аджибаев<sup>2\*\*</sup>, В.В. Атрошенко<sup>1,2\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – ООО “ГАЦ РБ”, 450001 Уфа, ул. Пархоменко, д. 155/1

<sup>2</sup> – ФГБОУ ВО “УУНУТ”, 450008 Уфа, ул. К. Маркса, д. 12

\* - [savichevmax@mail.ru](mailto:savichevmax@mail.ru); \*\* - [danno23@mail.ru](mailto:danno23@mail.ru); \*\*\* - [91250@mail.ru](mailto:91250@mail.ru)

**Целью данной работы** является демонстрация современных возможностей аттестационных центров по работе с предприятиями-заказчиками в области применения методов неразрушающего контроля.

Эффективная работы аттестационных центров специалистов неразрушающего контроля (АЦСНК) обусловлена развитой материально-технической базой. Для каждого метода неразрушающего контроля (НК) регламентирован перечень оборудования, настроечных и стандартных образцов [1]. Это достаточно дорогостоящее оборудование, требующее ежегодной поверки и технического обслуживания. Также каждый АЦСНК обязан иметь в штате специалистов по неразрушающему контролю высокой квалификации (не менее трех экзаменаторов 3 уровня).

Как показывает практика общения с предприятиями-заказчиками в ходе аттестационных процедур, имеется много нестандартных, узких или сложных производственных задач по НК, которые они не в состоянии решить на своих предприятиях. Причины – недостаток оборудования, квалифицированных кадров и (или) разработанных методик контроля. С решением этих проблем могут помочь специалисты, использующие оборудование аттестационных центров. В данной работе приведен накопленный опыт АЦСНК ООО “СваркаТехСервис” (г. Уфа).

Наибольшее число обращений связано с цифровой радиографией. В АЦСНК применяется комплекс цифровой радиографии “Цифракон”. Перечень актуальных работ, выполненных в нашем центре: контроль газотурбинных лопаток энергетического машиностроения, контроль паянных соединений резцов буровых долот, контроль буровых труб, контроль литых деталей для ПАО “Камаз”, контроль шагового двигателя модуля обратной магистрали, центраторы пружинные для цементированых участков стволов скважины, контроль сварных соединений медных и алюминиевых сплавов, полученных сваркой трением с перемешиванием. Выполняются работы по люминесцентному контролю лопаток 1-4 ступеней газотурбинных установок, организован отдельный участок механизированного контроля. Капиллярный контроль мест течи трансформатора для «Уфимского трансформаторного завода», смонтированного в г. Сочи. Для контроля внутренней и наружной поверхностей буровых труб выполняли магнито-

люминесцентный контроль, а также комбинацию оптического и люминесцентного методов контроля.

Многие машиностроительные предприятия нашего региона активно занимаются импортозамещением и обращаются с рядом проблем: определению химического состава сплавов (с использованием рентгено-флуоресцентного и оптико-эмиссионных спектрометров), определению твердости, изготовления макрошлифов для определения типа сварного шва.

Часть заказчиков заинтересована не только в проведении контроля, но и в проведении мастер-классов на специализированном оборудовании. Так проводилось выездное обучение персонала “Даймлер-Камаз” по ультразвуковому контролю контактной точечной сварки, обучение дефектоскопистов контролю кольцевых стыков газопроводов на многоканальном дефектоскопе УСД-8К.

Имеющиеся в центре ультразвуковые дефектоскопы с фазированными антенными решетками применяются не только для обучения, но и для разработки методик контроля кольцевых стыков трубопроводов [2, 3, 4].

### **Выводы**

Аттестационные центры, обладающие развитой материально-технической базой, современным оборудованием и специалистами НК высокой квалификации, могут успешно решать сложные производственные задачи предприятий-заказчиков. Это поддерживает положительный имидж организации, помогает обновлять базу экзаменационных образцов реальными производственными изделиями, а также получать дополнительные средства на приобретение нового оборудования.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. СНК ОПО РОНКТД – 04–2024 «Система неразрушающего контроля на опасных производственных объектах. Требования к аттестационным центрам».
2. *Атрощенко В.В., Аджигае Д.А., Савичев М.П.* Разработка методики ультразвукового контроля равнотолщинных стыковых сварных соединений дифракционно-временным методом // Сборник статей 8-й Международной научно-технической конференции «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов», Могилев, 29–30 сентября, 2022. Могилев: Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования "Белорусско-Российский университет", 2022. С. 16-20.
3. *Адебайо Д.А., Савичев М.П., Атрощенко В.В.* Разработка методики механизированного ультразвукового контроля сварных соединений трубопроводов методами ФР+ТОФД с применением дефектоскопа УСД-60ФР-16/128 // Тезисы докладов XXXIV Уральской конференции с международным участием «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)», Пермь, 20–21 апреля, 2023. Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2023. С. 64-65.

# ИМПУЛЬСНЫЙ ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОРУНДОВОЙ КЕРАМИКИ

© 2025 г. Сергей Евгеньевич Черных<sup>1\*</sup>, В.П. Вавилов<sup>2\*\*</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*

<sup>2</sup> – *Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050 Томск, пр. Ленина, д. 30*

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

Целью исследования являлось изучение возможности обнаружения внутренних дефектов в корундовых керамических пластинах методом активного теплового контроля (ТК) с использованием импульсного нагрева [1]. Представлены результаты исследования образцов из корундовой керамики с искусственными дефектами с применением ксеноновых ламп в различных схемах теплового контроля (ТК) [2].

Среди прочих керамик в промышленности наиболее распространена корундовая керамика, обладающая наивысшими показателями твердости, прочности и химстойкости при минимальной цене [3]. Существует множество примеров экстремального использования корундовых керамических плиток, где особое внимание уделяется качеству, так как в этих условиях любой дефект может привести к катастрофическим последствиям. Одним из методов неразрушающего контроля керамики является ТК или инфракрасная термография [4]. На данный момент работы по ТК корундовой керамики практически отсутствуют. Авторы считают, что данное направление требует развития, в частности, при неразрушающем контроле готовых изделий с заданными свойствами.

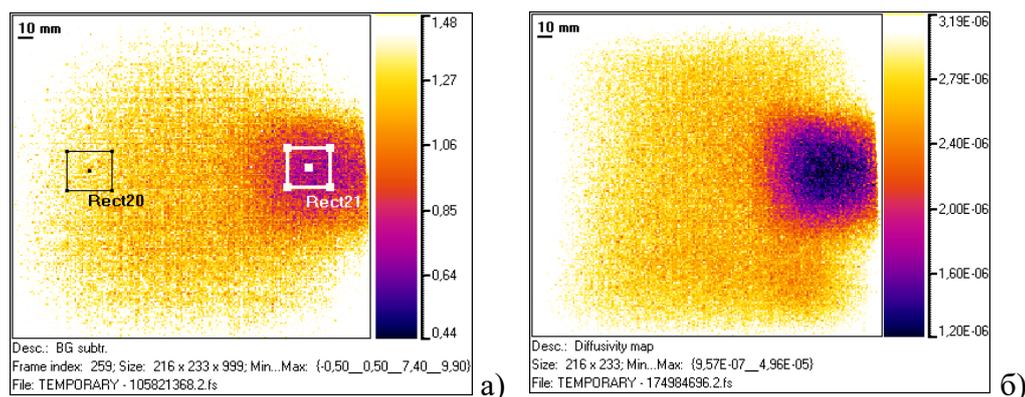


Рис. 1. Образец с внутренним дефектом при двустороннем ТК:

а) – исходная термограмма, б) – карта теплопроводности

Образцы для исследования в форме плиток  $55 \times 55 \times 10$  мм изготавливали методом шликерного литья в гипсовые формы. Искусственные дефекты представляли собой воздушные полости различной геометрии, что соответствовало утонению материала в этих областях до 30 %.

Термографирование образцов проводили при различных схемах ТК с записью последовательностей термограмм. В первой части испытаний применен двусторонний ТК (рис. 1а) с последующей обработкой термограмм по методу Паркера с построением карт температуропроводности (рис. 1б). Во второй части испытаний применяли односторонний ТК (рис. 2).

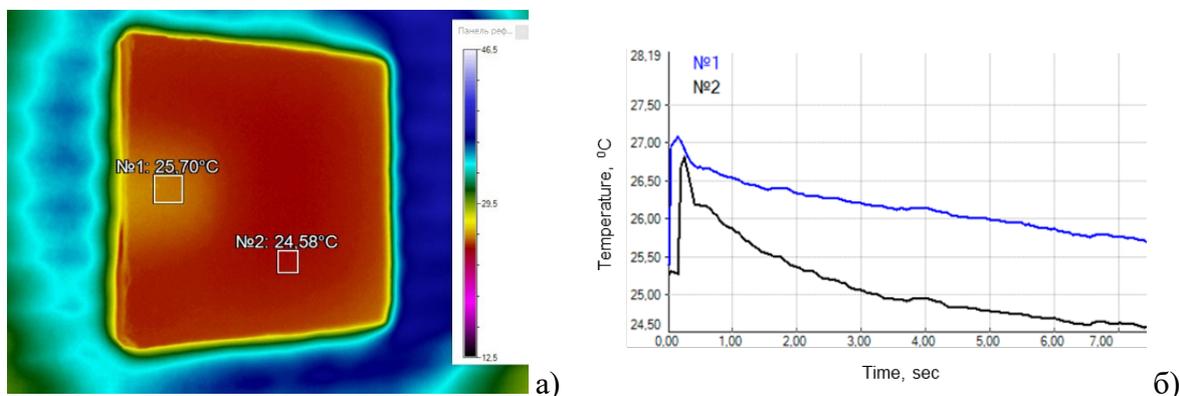


Рис. 2. Образец с внутренним дефектом при одностороннем ТК:

а) – исходная термограмма, б) – профили температуры поверхности во времени

Установлено, что при использовании импульсного нагрева при активном ТК выявляемые дефекты хорошо идентифицируются на исходных термограммах и, в особенности, на картах температуропроводности. Уверенно определяются как места расположения дефектов, так и их формы.

Показано, что активный тепловой неразрушающий контроль с использованием ксеноновых ламп может быть использован для дефектоскопии структуры плиток из корундовой керамики и обнаружения внутренних несплошностей, образование которых возможно при производстве изделий.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль (2-е издание). М.: ИД «Спектр», 2013. 545 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. Zhike Z. Review of non-destructive testing methods for defect detection of ceramics // Ceramics International. 2021. V. 47. No. 4. P. 4389–4397.

## СНИЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСЕДНИХ ДЕТАЛЕЙ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ ПРОПАЯННОСТИ БОКОВЫХ СТенок ТОКОВЕДУЩИХ СОЕДИНЕНИЙ СТАТОРОВ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ

© 2025 г. Леонид Хонович Коган<sup>1\*</sup>, А.Н. Сташков<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*

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

В современных конструкциях статоров гидрогенераторов применяется соединение медных токоведущих стержней с использованием соединительных планок. В таких соединениях необходимо контролировать качество пайки этих планок (боковых стенок) с выводными концами токоведущих стержней. В работе [1] показана возможность контроля пропаянности таких соединений с использованием трансформаторного вихретокового преобразователя с прямоугольными вырезами в полюсах П-образного сердечника. Мешающими факторами при таком контроле являются: изменение в пределах допуска геометрических размеров контролируемых соединений, возможная вариация их электросопротивления и влияние соседних соединений. В работах [2, 3] показаны способы отстройки от первых двух факторов. Целью данной работы является разработка эффективного способа снижения влияния соседних деталей на результаты вихретокового контроля качества пайки боковых стенок токоведущих соединений статоров гидрогенераторов.

Для определения возможности отстройки от влияния соседних соединений использовались два образца: хомут (23,44×50,65×40,0 мм) с медной вставкой, имитирующей нулевую пропаянность боковой стенки; сплошной медный образец (23,57×50,79×40,0 мм), имитирующий стопроцентную пропаянность. Измерения проводились с применением трансформаторного вихретокового преобразователя (ВТП) оригинальной конструкции [1], в прямоугольные вырезы П-образного сердечника которого попеременно помещались образцы. Измерения проводились на двух частотах: 60 и 1460 Гц. Согласно нормативной документации, номинальное расстояние между соседними соединениями составляет 37,6 мм и может варьироваться в пределах 3 мм. Соседние детали размещали на расстоянии от 32,6 до 42,6 мм с двух сторон от ВТП. Для уменьшения влияния соседних деталей на результаты контроля ВТП экранировался с внешних сторон с помощью двухслойного экрана из отожженной трансформаторной стали.

При измерении на  $f = 60$  Гц без экрана разность показаний  $\Delta U_{\text{изм}}$  при измерении на этих образцах (в отсутствии соседних деталей) составила  $\Delta U_{\text{изм}} = 176$  мВ. При помещении соседних деталей с двух сторон от ВТП на расстоянии 37,6 мм показания при измерении на обоих образцах уменьшались на 49 мВ. Аналогично при измерении на  $f = 1460$  Гц  $\Delta U_{\text{изм}} = 84$  мВ, а соседние детали уменьшали показания ВТП на 239 мВ. Установлено, что с помощью оптимизации

размеров экрана, его толщины и количества слоев, а также расстояния между ними удалось добиться полной отстройки от влияния соседних соединений на результаты контроля качества пайки.

Таким образом, удалось добиться полной отстройки от влияния соседних соединений на результаты контроля качества пайки. При этом чувствительность измерительной системы ВТП уменьшилась на 27 %, что не является критическим фактором при проведении контроля, а габаритные размеры ВТП практически не изменились.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ для ИФМ УрО РАН.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коган Л.Х., Сташков А.Н., Ничипурук А.П. Повышение достоверности вихретокового контроля качества пайки токоведущих медных соединений и расширение номенклатуры контролируемых соединений в энергетическом оборудовании // Дефектоскопия. 2018. № 11. С. 43–48.
2. Коган Л.Х., Сташков А.Н., Ничипурук А.П. Контроль качества пайки боковых стенок хомутов в токоведущих соединениях электрических машин с учетом влияния их размеров // Дефектоскопия. 2022. № 12. С. 59–69.
3. Kogan L.K., Stashkov A.N. The effect of the electrical resistivity of conductive copper connections on the reliability of testing the soldering quality of clamp side walls by the amplitude eddy current method // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2024. V. 5. P. 181–194.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УЧАСТКОВ ТРУБОПРОВОДА В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ С ЦЕЛЬЮ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

© 2025 г. Ольга Николаевна Василенко<sup>1\*</sup>, К.Е. Мызнов<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>, А.С. Саломатин<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», 620000 Екатеринбург, ул. К. Цеткин, д. 14  
\* - [vasilenko@imp.uran.ru](mailto:vasilenko@imp.uran.ru); \*\* - [myznov@imp.uran.ru](mailto:myznov@imp.uran.ru); \*\*\* - [kostin@imp.uran.ru](mailto:kostin@imp.uran.ru)

Разработка методов неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) магистральных трубопроводов, испытывающих сложные нагрузки различного характера, является актуальной задачей. Существующие подходы, такие как полевые испытания с одним измеряемым параметром [1, 2] и лабораторные исследования, использующие стационарные установки, не применимые в реальных условиях [3], не позволяют однозначно определить влияние нагрузок на магнитные свойства трубы [4]. В качестве информативных параметров рассматриваются коэрцитивная сила  $H_c$ , остаточная магнитная индукция  $B_r$  и другие магнитные характеристики, однако отсутствуют широко распространённые методики их использования для оценки НДС. Перспективным направлением является применение приборов, способных измерять несколько магнитных параметров или всю петлю гистерезиса, что повышает точность и достоверность контроля. Таким прибором является магнитный мультитестер ММТ-3 [5], использованный в настоящей работе.

Проведена серия измерений на четырёх участках трубопровода из стали 17Г1С с помощью мультитестера ММТ-3. Зоны контроля находились на пересечении трёх поперечных сечений и четырёх продольных сторон на 3, 6, 9 и 12 часах, а измерения проводились при намагничивании как вдоль оси, так и поперёк оси (вдоль окружности) трубопровода. Для разных поперечных сечений участков трубопровода рассчитан коэффициент нагруженности [6, 7], который используется для определения уровня НДС трубопровода. Наиболее чувствительными к изменению НДС оказались измерения, полученные с помощью ММТ-3 на верхней части трубы, то есть на стороне 12 ч, при намагничивании вдоль оси трубопровода.

В результате установлено, что:

- Наиболее подходящим местом для оценки напряженно-деформированного состояния с использованием магнитных характеристик является верхняя часть трубы (сторона на 12 часах). При этом измерения следует проводить при намагничивании вдоль оси трубы.

- Участки с повышенным коэффициентом нагруженности, превышающим критическое значение 1,2, наиболее подвержены разрушению. Для этих участков характерны сниженные значения  $H_c$  и  $B_r$ , измеренные при намагничивании вдоль оси трубопровода.

- Одновременное измерение коэрцитивной силы и остаточной магнитной индукции повышает точность оценки НДС и увеличивает чувствительность к изменению НДС, минимизируя ошибки при интерпретации данных.

- Для измерения вдоль окружности трубопровода целесообразно разработать специализированные наконечники, которые обеспечат более надежный контакт между образцом и измерительным преобразователем.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Захаров В.А., Ульянов А.И., Горкунов Э.С. Коэрцитивная сила ферромагнитных сталей при двухосном симметричном растяжении материала // Дефектоскопия. 2011. № 6. С. 3–15.
2. Безлюдько Г.Я., Мужичкий В.Ф., Ремезов В.Б. Серия портативных приборов-структуроскопов, основанных на измерении величины коэрцитивной силы // Дефектоскопия. 2003. № 4. С. 43–51.
3. IEC 60404-4 Magnetic materials – Part 4: Methods of measurement of d.c. magnetic properties of magnetically soft materials.
4. Горкунов Э.С., Мушников А.Н. Магнитные методы оценки упругих напряжений в ферромагнитных сталях (обзор) // Контроль. Диагностика. 2020. Т. 23. № 12(270). С. 4–23.
5. Костин В.Н., Василенко О.Н., Михайлов А.В., Лукиных Н.П., Ксенофонтов Д.Г. О преимуществах локального измерения коэрцитивной силы ферромагнитных объектов по внутреннему полю // Дефектоскопия. 2020. № 7. С. 21–27.
6. Рекомендации по оценке прочности и устойчивости эксплуатируемых МГ и трубопроводов КС / дата введения 24.11.2006. М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2007. 42 с.
7. СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. М.: Госстрой, 2013. 93 с.

# БЕСКОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТОСТРИКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

© 2025 г. Александр Николаевич Мушников<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> – ИМАШ УрО РАН, 620049 Екатеринбург, ул. Комсомольская, д. 34

\* - [mushnikov@imach.uran.ru](mailto:mushnikov@imach.uran.ru)

Эффект магнитострикции находит широкое применение в различных областях техники и промышленности. Специальные магнитострикционные материалы, деформация которых в насыщении может достигать величин порядка  $10^{-3}$ , активно используются в прецизионных измерительных приборах, датчиках и преобразователях. В то же время растет интерес к исследованию магнитострикции конструкционных материалов, величина эффекта у которых на несколько порядков меньше. Интерес обусловлен в том числе тем, что магнитоупругий эффект, то есть изменение магнитных характеристик под действием упругих деформаций, является термодинамически обратным к эффекту магнитострикции, а значит параметры полевых зависимостей магнитострикции теоретически могут быть использованы для оценки напряженно-деформированного состояния конструкций. Однако пока это не находит практического применения ввиду того, что классические методы измерения магнитострикционных деформаций [1] требуют большого времени на подготовку для одного измерения (тензометрический метод) или не позволяют проводить измерения на крупногабаритных изделиях (дилатометрия). Поэтому представляет интерес разработка новых подходов для проведения экспресс-измерений магнитострикции, в том числе бесконтактными методами [2].

В докладе рассмотрен способ определения магнитострикционных деформаций, основанный на методе корреляции цифровых изображений. Созданная лабораторная установка была успешно испытана на сталях, магнитострикция которых не превышает величин порядка  $10^{-5}$ .

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИМАШ УрО РАН (№ НИОКТР 124020600045-0). При выполнении работы было использовано оборудование ЦКП «Пластометрия» при ИМАШ УрО РАН.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Белов К.П. Магнитострикционные явления и их технические приложения. М.: Наука, 1987. 160 с.
2. Serbin E.D., Perov V.N., Kostin V.N. Non-Contact Measurement of the Dynamic Magnetostriction Parameters of Ferromagnets // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2023. Iss. 6. P. 121–131.

## К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА В ОБЛАСТИ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПОЛИЭТИЛЕНОВОГО ТРУБОПРОВОДА

© 2025 г. **Кирилл Игоревич Доронин<sup>1\*</sup>, Д.В. Копытина<sup>1\*\*</sup>, Е.К. Щипцова<sup>1\*\*\*</sup>**

<sup>1</sup> – ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»,  
199106 Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., д. 2

\* - [doronin.k.i@mail.ru](mailto:doronin.k.i@mail.ru); \*\* - [daryakopytina2000@yandex.ru](mailto:daryakopytina2000@yandex.ru);

\*\*\* - [shchiptsova.katya@yandex.ru](mailto:shchiptsova.katya@yandex.ru)

При проведении монтажа полиэтиленовых трубопроводов для газо- и водораспределительных систем не существует единого подхода к определению качества стыковых сварных соединений. В стандарте ГОСТ Р 55276 – 2012 (ISO 21307:2011) указано, что при контроле качества сварного соединения бимодального полиэтилена (ПЭ) используют разрушающие методы испытаний [1]. При этом этот же документ отмечает, что для неразрушающей оценки качества сварного соединения могут использоваться и физические методы неразрушающего контроля, однако на текущий момент они могут не обнаружить все дефекты соединения. Классические испытания на растяжения также не всегда четко определяют пороговые требования к качеству сварного соединения, как например ГОСТ ISO 13953 – 2024 [2]. В соответствии с описанной процедурой, за результат испытания принимают только разрушения по месту соединения, однако конкретное определение термина «место соединения» не указывается. Сварное соединение ПЭ также может иметь зону термического влияния (ЗТВ), что расширяет границы условного определения места соединения. Целью данной работы было определение границ ЗТВ при стыковой сварке ПЭ труб.

В качестве метода определения границ ЗТВ целесообразно использовать методы индентирования, так как они способны локально определять механические свойства, связанные с прочностными характеристиками самого материала. Для первичного исследования механических свойств вблизи сварного соединения ПЭ использован метод определения твердости по шкале Виккерса по стандарту ГОСТ 9450 – 76 [3]. В качестве средства измерения использован микротвердомер ПМТ-3М. Испытательная нагрузка составила 0,4905 Н (0,05 кгс), что соответствует шкале HV0.05.

В качестве образца для испытания выступает поперечный срез сварного соединения ПЭ труб из марки ПЭ100, представленный на рис. 1. Зона измерения составила 22 мм поперек самого соединения с шагом 0,5 мм между измерениями. Проведено три серии измерений в различных областях относительно толщины стенки: 1 – ближе к внешней стенке трубы, 2 – середина стенки, 3 – ближе к внутренней стенке. Такая схема обусловлена наличием зоны утонения при стыковой сварке в середине стенки трубы.

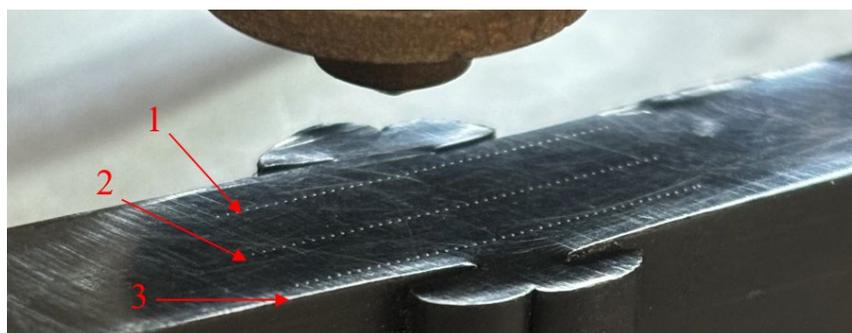


Рис. 1. Внешний вид образца для испытаний (1 – внешняя сторона, 2 – середина, 3 – внутренняя сторона)

Результаты расчета твердости по шкале Виккерса представлены на рис. 2. Схожий характер изменения твердости по Виккерсу относительно сечения сварного соединения также отмечен в [4], однако в том случае использовалась нагрузка 0,005 кгс.

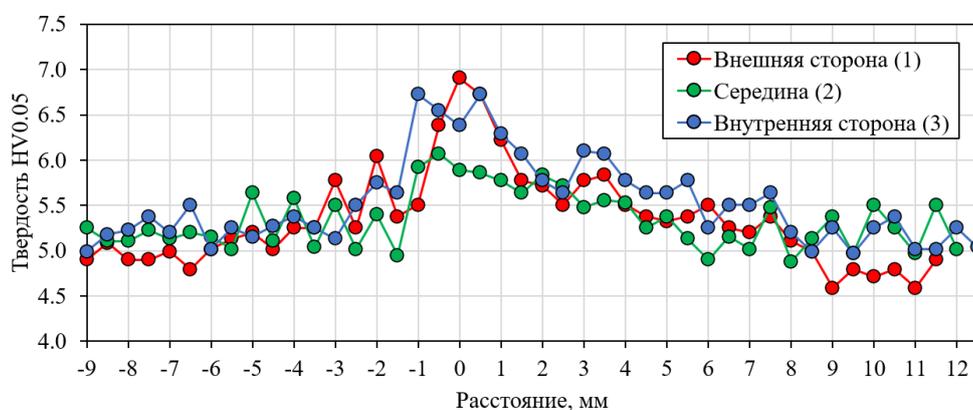


Рис. 2. График зависимости твердости HV0.05 от расстояния от центра соединения

В процессе исследовательских испытаний выявлен предполагаемый размер ЗТВ, который составил 6 мм. Отмечено, что характер изменения свойств несимметричен относительно расстояния от середины сварного соединения. Для уточнения значений целесообразно использование более автоматизированных средств с возможностями пакетной обработки, например, сканирующих нанотвердомеров. В дальнейшем также планируется использование полученных значений для моделирования зон сварного соединения ПЭ с различными характеристиками сопротивления к деформации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 55276–2012 (ИСО 21307:2011). Трубы и фитинги пластмассовые. Процедуры сварки нагретым инструментом встык полиэтиленовых (ПЭ) труб и фитингов, используемых для строительства газо - и водопроводных распределительных систем.
2. ГОСТ ISO 13953-2024. Трубы и фитинги из полиэтилена (ПЭ). Определение предела прочности при растяжении и типа разрушения образцов для испытаний сварного стыкового соединения.
3. ГОСТ 9450–76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников.
4. *Lai H., Fan D., Liu K.* The Effect of Welding Defects on the Long-Term Performance of HDPE Pipes // *Polymers*. 2022. V. 14. P. 3936.

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ КРН-ТРЕЩИН ПРИ ВНУТРИТРУБНОЙ МАГНИТНОЙ ДИАГНОСТИКЕ

© 2025 г. Юрий Леонидович Гобов<sup>1\*</sup>

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

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

На текущий момент более трети аварий на магистральных газопроводах (МГ) Единой системы газоснабжения (ЕСГ) ПАО «Газпром» происходит в результате развития дефектов стресс-коррозии или коррозионного растрескивания под напряжением (КРН). В мировой практике среди всех остальных причин аварий МГ этот вид повреждения трубопроводов имеет наибольший удельный вес.

Метод MFL (метод магнитного потока рассеяния) не выявляет достоверно неглубокие (менее 15 % толщины стенки трубопровода) стресс-коррозионные трещины из-за того, что магнитный сигнал от внешней трещины глубиной 5-15 % сопоставим по амплитуде с уровнем шума, который регистрируется датчиками из-за шероховатости внутренней поверхности трубопровода.

Необходимо отметить, что в настоящее время по магнитограммам реальных дефектов КРН, обнаруженных на магистральных газопроводах внутритрубными дефектоскопами, MFL установлено, что они способны обнаруживать трещины КРН с глубиной, меньше 15 %. Другой вопрос, что уверенное (с вероятностью, не ниже 80 %) выявление и идентификация магнитными методами стресс-коррозии глубиной менее 15 % от толщины стенки в настоящее время считается невозможным.

Для мониторинга КРН необходимо с высокой достоверностью не только обнаруживать, но и идентифицировать все трещины (одиночные и в колониях) с глубиной 10 % и даже меньше. Такая идентификация может быть, если создать внутритрубный снаряд, измеряющий поля рассеяния от дефектов в двух разных полях намагничивания трубы. Для проектирования подобного внутритрубного магнитного дефектоскопа необходима упрощенная аналитическая модель, объясняющая изменения полей от трещины с изменением приложенного магнитного поля  $H_0$ .

В работе [1] предложена новая математическая модель на основе упрощенной расчетной схемы магнитной цепи, описывающей обтекание магнитным потоком поверхностного дефекта в пластине. Такая модель позволяет рассмотреть с общих позиций дефекты типа трещин и широкие дефекты (типа коррозионные язвы и питтинговая коррозия, у которых ширина больше или равна глубине). Предложенная модель позволяет рассмотреть различные типы дефектов и определить, в каких случаях поля рассеяния от трещин будут существенно отличаться от других типов дефектов.

По результатам расчета математической модели были разработаны внутритрубные снаряды для продольного и поперечного намагничивания, реализующие одновременно два поля  $H_0$  в каждом снаряде.

На рис. 1 приведены результаты численного моделирования полей рассеяния ( $H_x - H_0$ ) от дефектов в приложенных полях, реализованных в этих снарядах ( $H_0 = 100$  А/см и  $H_0 = 200$  А/см).

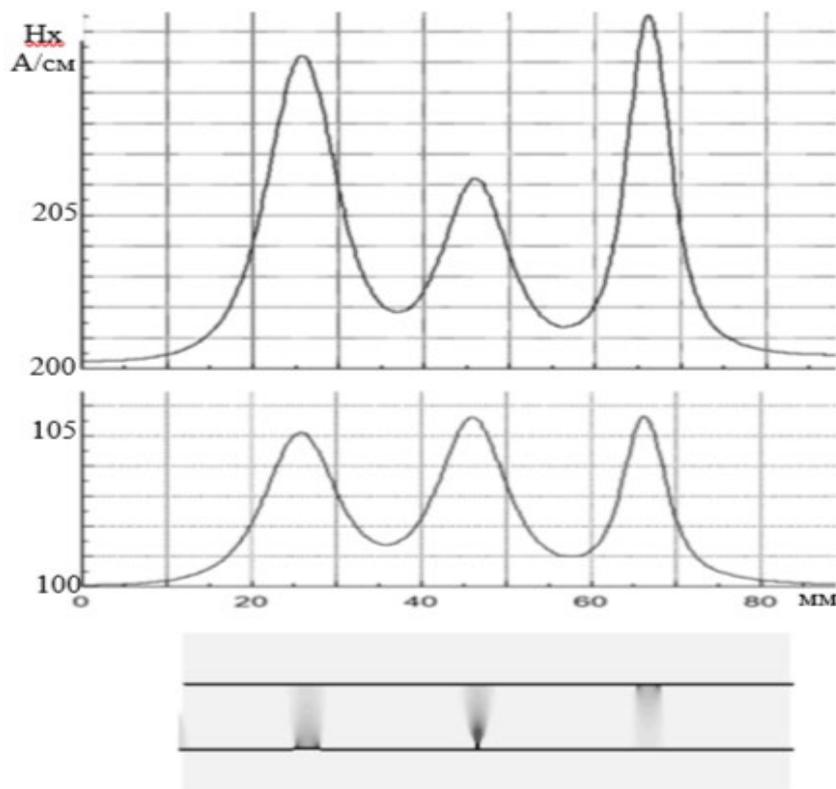


Рис. 1. Поле рассеяния ( $H_x - H_0$ ) в пластине ( $D = 10$  мм), создаваемое трещиной глубиной  $h = 1$  мм, раскрытием  $b = 50$  мкм и канавками шириной 3 мм ( $b = 0,25$  мм с «внутренней» поверхности и  $b = 0,2$  мм с «открытой» поверхности)

Из рис. 1 видно, что поля рассеяния от широких дефектов (дефекты типа общей коррозии) увеличились примерно в два раза при увеличении поля  $H_0$  от 100 до 200 А/см. А поле от трещины не изменилось. В таком случае трещину легко идентифицировать на фоне помех от мелких дефектов типа коррозии, даже если эти дефекты расположены с «открытой» поверхности, то есть со стороны измерения магнитного поля.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гобов Ю.Л. Идентификация трещин и математическая модель магнитостатического поля дефектов в пластине // Дефектоскопия. 2024. № 4. С. 28–38.

## ГЕЛИЕВЫЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СОСУДА ДЬЮАРА PPMS-9 С СИСТЕМОЙ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ГАЗА

© 2025 г. Денис Сергеевич Увин<sup>1\*</sup>, М.А. Черосов<sup>1\*\*</sup>, Р. Г. Батулин<sup>1\*\*\*</sup>  
<sup>1</sup> – *Институт физики, Казанский федеральный университет, 420008 Казань,  
ул. Кремлевская, д. 18*  
\* - *attractor.but@yandex.ru*; \*\* - *che027@yandex.ru*; \*\*\* - *tokamak@yandex.ru*

Неразрушающий контроль (НК) является жизненно важным процессом в производстве, обслуживании и обеспечении качества компонентов и систем. Он позволяет оценивать материалы и конструкции, не нанося ущерба и не изменяя их свойств, гарантируя, что они остаются пригодными для использования. Среди различных доступных методов неразрушающего контроля обнаружение утечек гелия выделяется как высокочувствительный и точный метод выявления утечек в герметичных системах [1]. Этот метод особенно важен в тех случаях, когда даже самые незначительные утечки могут поставить под угрозу безопасность, производительность или соответствие экологическим требованиям [2]. При обнаружении утечек гелия используются уникальные свойства газообразного гелия, в том числе его низкая молекулярная масса, инертность и способность быстро проникать через небольшие отверстия. Эти свойства делают гелий идеальным газом-индикатором для обнаружения утечек, которые в противном случае невозможно было бы обнаружить обычными методами. Используя передовую масс-спектрометрию или другие технологии обнаружения, система обнаружения утечек гелия может выявлять утечки со скоростью всего  $10^{-12}$  мбар·л/с, что значительно превосходит чувствительность других методов неразрушающего контроля. Однако одним из ключевых недостатков метода и дороговизны его использования является работа гелиевого течеискателя без систем рециркуляции.

Цель данной работы – описать принцип работы масс-спектрометрического метода для дефектоскопии гелиевого сосуда Дьюара установки для измерения физических свойств PPMS-9 с использованием гелиевого течеискателя Pfeiffer HLT 260 и системы рециркуляции. Вакуумные сосуды Дьюара представляют собой сложные устройства с большим количеством сварных и герметизированных соединений (рис. 1). Гелиевый масс-спектрометрический метод позволил определить и локализовать течь без дорогостоящей процедуры снятия кожухов и тепловых экранов. Наличие системы рециркуляции (системы сбора газообразного гелия) позволило собрать невосполнимый ресурс с эффективностью не менее 95 %.

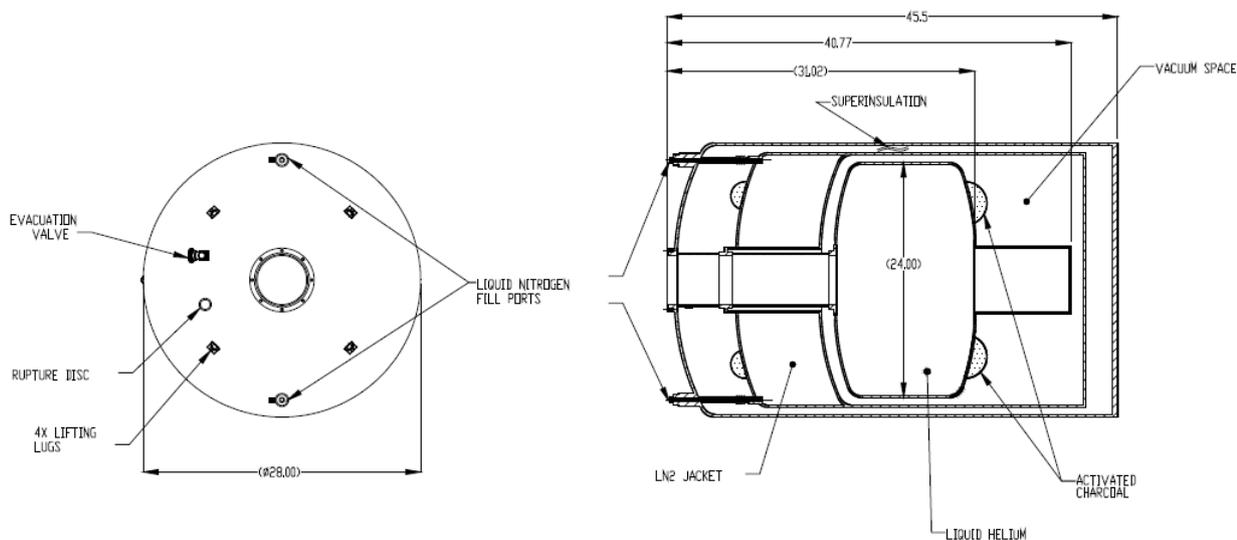


Рис. 1. Вид сверху (слева) и сечение сосуда Дьюара PPMS-9 повышенной емкости с азотной полостью

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bley W.G. Handbook of vacuum technology. Methods of leak detection. New York: Wiley, 2016. P. 907–942.
2. Jung W., Kim D., Ko S.H. Recent Progress in High-Efficiency Transparent Vacuum Insulation Technologies for Carbon Neutrality // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. 2024. V. 11. № 5. P. 1681–1702.

# ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ КОРРОЗИОННЫХ ДЕФЕКТОВ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ОПТИМИЗАЦИИ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ

© 2025 г. Леонид Вадимович Михайлов<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

Задача восстановления геометрии дефектов по измеренному магнитному полю рассеяния вблизи поверхности контролируемых изделий из ферромагнитных материалов является первостепенной в развитии электромагнитных методов неразрушающего контроля. Метод, основанный на регистрации магнитных полей рассеяния от дефектов (*англ.* «magnetic flux leakage», далее – «MFL»), позволяет оперативно и экономически эффективно обнаруживать участки объекта контроля с аномальными полями рассеяния. Однако оценка степени опасности дефекта по измеренному сигналу MFL является нетривиальной задачей. Исследования в области решения данной задачи можно разделить на три основные направления: решение обратной геометрической задачи магнитостатики, решение оптимизационных задач и обучение нейронных сетей [1, 2].

Классические методы оптимизации, основанные на вычислении градиента оптимизируемой функции, оказались неприменимы в задаче восстановления геометрии дефектов ввиду неоднозначности и отсутствия гладкого градиента минимизируемой функции. Использование методов, не использующих градиент, таких как генетический и метод роя частиц, требуют порядка тысяч итераций для достижения заданной точности, что приводит к значительным вычислительным затратам: каждое вычисление оптимизируемой функции сопровождается аналитическим или численным решением прямой задачи магнитостатики. Целью представленной в докладе работы было исследование применения методов оптимизации с ограничениями (*англ.* «constrained optimization») к задаче восстановления геометрических параметров поверхностных коррозионных дефектов.

В данной работе предложено использование метода, основанного на оптимизации с ограничениями. В качестве ограничений для поиска геометрических параметров дефектов предложено использовать данные, содержащиеся в сигнале MFL: координаты границ дефекта; координаты, соответствующие пику тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля  $H_t$ ; отношение нулевого уровня к пикам нормальной составляющей  $H_n$ .

Введение описанных выше ограничений в оптимизационную задачу позволяет уменьшить количество необходимых вычислений оптимизируемой функции и увеличить точность. На

практике удалось добиться среднеквадратичной ошибки менее 3 А/см при выполнении менее 100 итераций.

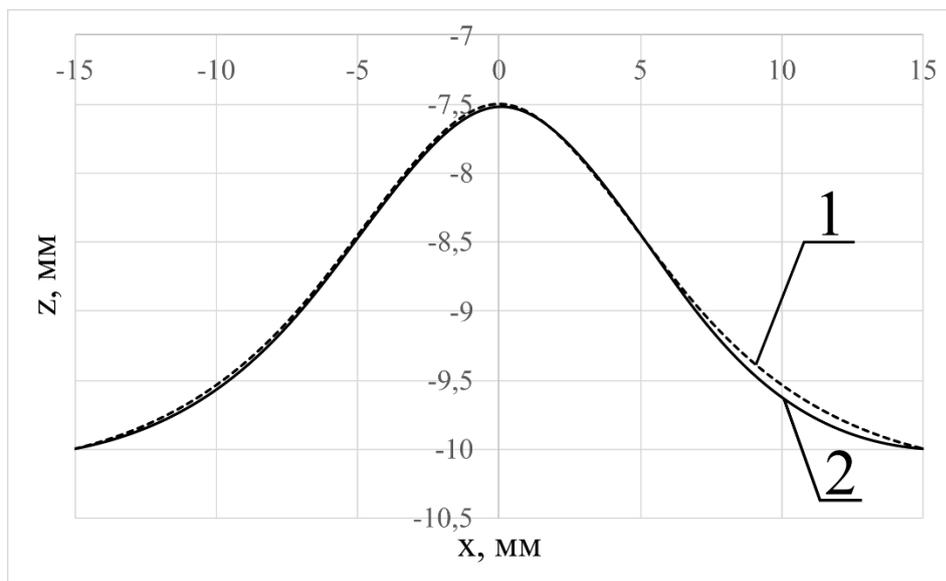


Рис. 1. Результат восстановления геометрии коррозионного дефекта:  
1 – целевая геометрия; 2 – восстановленная

В докладе подробно изложены основные принципы оптимизации с ограничениями. Сформулированы ограничения, опирающиеся на однозначное соответствие геометрии коррозионных дефектов с измеряемым сигналом. Предложен способ параметризации дефекта с использованием базисных сплайнов. Предложен способ решения прямой задачи с уменьшенным временем расчета методом конечных элементов.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Lu Senxiang, Liu Jinhai, Wu Jing, Fu Xuwei. A Fast Globally Convergent Particle Swarm Optimization for Defect Profile Inversion Using MFL Detector // Machines. 2022. V. 10. No. 11. P. 1091.
2. Carvalho A.A., Rebello J.M.A., Sagrilo L.V.S., Camerini C.S., Miranda I.V.J. MFL signals and artificial neural networks applied to detection and classification of pipe weld defects // NDT & E International. 2006. V. 39. I. 8.

## УПРОЩЕННОЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВО НЕОДНОЗНАЧНОСТИ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ МАГНИТОСТАТИКИ

© 2025 г. Андрей Владимирович Никитин<sup>1\*</sup>

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

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

Теоретическое исследование обратных задач магнитостатики является необходимым и важным этапом для увеличения информативности широко используемого в дефектоскопии MFL метода. Итак, сформулируем обратную задачу (ОЗ) магнитостатики.

Пусть пространственная область  $V$ , занятая ферромагнетиком и окруженная немагнитной средой, помещена во внешнее магнитное поле с напряженностью  $H_0$ . По измеренной напряженности результирующего магнитного поля  $H_e$  вне  $V$  требуется восстановить физические параметры ферромагнетика (магнитную проницаемость  $\mu$ ) и/или форму поверхности  $S(V)$ , ограничивающую область ферромагнетика  $V$ .

Строго вопрос случаев однозначности-неоднозначности решения ОЗ магнитостатики был сформулирован в [1, 2] с помощью основного уравнения магнитостатики, решаемого в вещественном гильбертовом пространстве вектор-функций  $L_2$ . Авторы, записав основное уравнение магнитостатики в операторном виде (исследовав свойства получившегося оператора) и используя разложение Вейля пространства  $L_2$  в сумму трех ортогональных подпространств, доказали неединственность (в общем случае) решения обратной задачи магнитостатики. Выбор пространства  $L_2$  авторы [1, 2] объясняют тем, что  $L_2$  соответствует физическому смыслу искомых величин, поскольку конечность магнитной энергии магнетика предполагает квадратичную суммируемость векторов магнитного поля (энергия магнетика пропорциональна  $\int_V \mathbf{B}H d\mathbf{r}$ ) и пространство  $L_2$  «достаточно широко, чтобы в нем содержались векторы магнитного поля для всего круга практически встречающихся магнитостатических задач» [2]. Однако строгое исследование в работах [1, 2] было весьма громоздким и опиралось на глубокие понятия функционального анализа (геометрия гильбертова пространства, линейные операторы, спектральная теория, пространства суммируемых функций, интегро-дифференциальные уравнения). Этот факт затруднял многим физикам понимание сути проведенного в [1, 2] исследования.

Но оказалось, что основные идеи доказательства случаев неединственности решения ОЗ можно показать, оставаясь в рамках классического математического анализа. Это значительно облегчает понимание основных причин неединственности решения ОЗ магнитостатики. Применим этот подход для решения ОЗ магнитостатики [3, 4]. Пусть имеется пространственная область  $V$ , ограниченная поверхностью  $S$ , и пусть во всех точках этой области заданы

дивергенция и ротор вектора  $\mathbf{a}$ . А во всех точках поверхности  $S$  заданы значения нормальной составляющей вектора  $\mathbf{a}$ .

$$\operatorname{div}(\mathbf{a}) = \rho(\mathbf{r}), \mathbf{r} \in V; \operatorname{rot}(\mathbf{a}) = \boldsymbol{\omega}(\mathbf{r}), \mathbf{r} \in V; a_n = f(M), M \in S, \quad (1)$$

условиями (1) векторное поле  $\mathbf{a}(\mathbf{r})$  восстанавливается однозначно [3, 4]. Для доказательства неоднозначности решения ОЗ удобно использовать основное уравнение магнитостатики (эквивалентное системе уравнений Максвелла [2]), после соответствующих преобразований это уравнение выглядит следующим образом:

$$\bar{\nabla} \left( \iiint_V \frac{\operatorname{div} \mathbf{M}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} dV' - \iint_S \frac{M_n(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} dS' \right) = 4\pi(\mathbf{H}_e(\mathbf{r}) - \mathbf{H}_0(\mathbf{r})), \quad (2)$$

где  $\mathbf{M}$  – намагниченность ферромагнетика,  $M_n$  – её нормальная составляющая на  $S$ .

Покажем, что уравнение (2) для определения  $\mathbf{M}(\mathbf{r})$  в  $V$  имеет бесчисленное множество решений, что влечет, например, неоднозначность определения  $\mu$ . Пусть  $\mathbf{M}_0(\mathbf{r})$  – решение уравнения (2), то есть при подстановке его в (2) получаем тождество. С помощью (1) найдем вектор-функцию  $\mathbf{b}(\mathbf{r})$ , для которой  $\rho(\mathbf{r}) = 0$ ;  $f(M) = 0$ ; с произвольной функцией  $\boldsymbol{\omega}(\mathbf{r})$ , с единственным ограничением  $\operatorname{div}(\boldsymbol{\omega}(\mathbf{r}))=0$ , тогда непосредственной подстановкой в уравнение (2) нетрудно убедиться, что, если  $\mathbf{M}_0(\mathbf{r})$  является решением уравнения (2), то и  $\mathbf{M}_0(\mathbf{r}) + \mathbf{b}(\mathbf{r})$  тоже является решением этого уравнения. Поскольку можно найти бесконечное число  $\boldsymbol{\omega}(\mathbf{r})$ , то уравнение (2) имеет бесконечно много решений.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дякин В.В., Кудряшова О.В., Раевский В.Я. К вопросу о корректности прямой и обратной задачи магнитостатики. Часть 2 // Дефектоскопия. 2018. № 10. С. 15–24.
2. Дякин В.В. Математические основы классической магнитостатики. Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2016. 403 с.
3. Кочин Н.Е. Векторное исчисление и начала тензорного исчисления. М.: Наука, 1965. 427 с.
4. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗОВ. М.: Наука, 1986. 544 с.

## КРАЕВОЙ И РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТЫ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК С ПОМОЩЬЮ ПРИСТАВНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

© 2025 г. Данила Григорьевич Ксенофонтов<sup>1\*</sup>, А.А. Беспрозванный<sup>1,2</sup>,  
О.Н. Василенко<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> – Уральский федеральный университет имени первого Президента России  
Б.Н. Ельцина, 620075 Екатеринбург, ул. Мира, д. 19

\* - ksenofontov@imp.uran.ru

Магнитная структуроскопия является одним из разделов неразрушающего контроля. Она основана на взаимосвязи структуры ферромагнетиков с их механическими, магнитными и другими свойствами. Для измерения статических магнитных характеристик реальных изделий применяются приставные преобразователи, образующие с объектом контроля составную магнитную цепь [1]. Известно, что форма и размер объектов контроля влияют на результат измерений магнитных характеристик [2]. Например, при измерениях в стационарных установках в замкнутой магнитной цепи на форму и размеры образцов накладываются строгие ограничения [3, 4]. Ещё в ранних работах по магнитному структурному анализу отмечались требования к площади поперечного сечения контролируемого участка изделия при контроле с помощью приставных измерительных преобразователей. Современные средства измерений позволяют измерять не только коэрцитивную силу по размагничивающему току, но и петли магнитного гистерезиса в координатах «индукция – напряжённость магнитного поля в объекте контроля» и «индукция – ток в намагничивающих катушках» [5]. Из-за выросшего количества измеряемых параметров и изменения способа измерений необходимо исследовать влияние размера объектов контроля и влияния бокового рассеяния магнитного потока на результаты измерений.

Для достижения поставленной цели были проведены измерения магнитных характеристик образцов из стали 3 с различными размерами. При измерении использовался приставной измерительный преобразователь с полюсами размером 12×28 мм и межполюсным расстоянием 32 мм. Контактная площадка преобразователя имела размеры 56×28 мм. Образцы имели следующие размеры:

1. образец № 1 (без рассеяния) – 56×28×4,5 мм, совпадает по размерам с контактной площадкой, боковое рассеяние магнитного потока минимально;
2. образец № 2 (узкий) – 300×28×4,5 мм, совпадает по ширине с контактной площадкой, образец вносит дополнительное рассеяние магнитного потока вдоль преобразователя;
3. образец № 3 (широкий) – 56×300×4,5 мм, совпадает по длине с контактной площадкой, образец вносит дополнительное рассеяние магнитного потока поперёк преобразователя.

На образце № 3 также были проведены измерения с ориентацией преобразователя по длинной стороне образца, таким образом дополнительное боковое рассеяние магнитного потока происходит в обоих направлениях. Преобразователь перемещался от края образца к середине с шагом 1 см, и проводились измерения статических магнитных характеристик.

Из полученных зависимостей видно, что имеет место как краевой эффект (изменение измеряемых значений при удалении от края), так и размерный эффект (изменение измеряемых значений в зависимости от площади образца вдали от краёв). Следовательно, при интерпретации результатов измерений, полученных на объектах контроля различных размеров или полученных в различных участках объекта контроля, может быть сделан ошибочный вывод о структуре и фазовом составе объектов или их распределении. Из вышесказанного следует вывод, что необходимо учитывать размер объекта контроля и возникающее боковое рассеяние магнитного потока. Для этого в дальнейшем возможно применять различные регрессионные модели расчёта магнитных характеристик, в том числе полученные путём машинного обучения.

*Д. Ксенофонтов благодарит Институт физики металлов имени М.Н. Михеева за поддержку его работы по государственному заданию Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН, которая выполнялась в рамках молодежного проекта ИФМ УрО РАН № 9-24*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: В 3 кн. Кн. 1. *Клюев В.В., Мужижкий В.Ф., Горкунов Э.С., Щербинин В.Е.* Магнитные методы контроля. Кн. 2. *Филинов В.Н., Кеткович А.А., Филинов М.В.* Оптический контроль. Кн. 3. *Матвеев В.И.* Радиоволновой контроль. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение, 2006. 848 с.
2. *Вонсовский С.В., Михеев М.Н.* Магнитный структурный анализ // Заводская лаборатория. 1957. № 10. С. 1221–1226.
3. ГОСТ 8.377-80 Государственная система обеспечения единства измерений. Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик
4. IEC 60404-4:1995/AMD2-2008 Amendment 2 - Magnetic materials - Part 4: Methods of measurement of d.c. magnetic properties of magnetically soft materials.
5. *Костин В.Н., Василенко О.Н., Бызов А.В.* Мобильная аппаратно-программная система магнитной структуроскопии DIUS-1.15M // Дефектоскопия. 2018. № 9. С. 47–53.

# ПРИМЕНЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЁРДОСТИ ТЕРМООБРАБОТАННЫХ СТАЛЕЙ ПО СТАТИЧЕСКИМ МАГНИТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

© 2025 г. Андрей Александрович Беспрозванный<sup>1,2</sup>, Д.Г. Ксенофонов<sup>1</sup>,  
О.Н. Василенко<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> – Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
620075 Екатеринбург, ул. Мира, д. 19

\* - ksenofontov@imp.uran.ru

Для «мягких» магнитных материалов, таких как электротехнические стали, и «твердых» магнитных материалов, таких как постоянные магниты, большой интерес представляют сами магнитные характеристики. Эти свойства определяют эксплуатационные характеристики изделия: трансформатора, магнита, электродвигателя, генератора и т.д. Для «полутвердых» магнитных материалов, таких как конструкционные стали, магнитные характеристики не определяют свойства изделия, но могут быть использованы для оценки этих свойств. Магнитный структурный анализ основан на корреляции между магнитными и механическими характеристиками ферромагнитных материалов. Существует большое разнообразие методик магнитного структурного анализа. Для прогнозирования свойств можно использовать несколько подходов: от простой линейной регрессии и множественной линейной регрессии до сложных регрессионных алгоритмов и нейронных сетей. Определение структуры и весов модели называется машинным обучением, для которого требуется набор данных определенного размера.

Машинное обучение применительно к магнитному структурному анализу применяется уже давно [1]. В связи с ростом вычислительных мощностей широкое распространение получили нейронные сети. Существует несколько работ, посвященных применению нейронных сетей для анализа структур электромагнитными методами [2, 3]. Однако существующие исследования ограничены наборами измеряемых характеристик, характерных для определенного подхода. Во многих исследованиях, посвященных магнитному структурному анализу, используется от нескольких до пары десятков образцов. Такие небольшие наборы данных сложны в использовании.

В данной работе рассматривается применение машинного обучения различных моделей, основанных на статических магнитных характеристиках, таких как коэрцитивная сила по индукции, остаточная магнитная индукция и максимальная магнитная проницаемость. Цель работы: повышение точности прогнозирования механических свойств изделий с помощью магнитной структуроскопии путем применения современных алгоритмов машинного обучения. В частности, рассматривается задача по неразрушающему контролю твёрдости сталей после их термической обработки. Задачи работы: обучение различных моделей на небольших наборах

данных, сравнение производительности после обучения, оценка необходимого набора измеряемых параметров.

Статические магнитные характеристики измерялись на установке Remagraph C-500 в соответствии с МЭК 60404-4 [4]. Обучающий набор данных был сформирован по результатам измерений статических магнитных характеристик сталей 20Н2М и 7Х3, имеющих различные температуры закалки и отпуска. Размеры образцов составляли 10×10×65 мм. Общее количество образцов – 18 для 20Н2М и 20 для 7Х3. Такой размер обучающего набора данных характерен для исследований по магнитной структуроскопии.

В результате работы были получены различные математические модели для предсказания твёрдости по статическим магнитным характеристикам, измеренным в замкнутой магнитной цепи. Полученные модели были сравнены между собой по величине скорректированного значения коэффициента детерминации.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: В 3 кн. Кн. 1. *Клюев В.В., Мужичкий В.Ф., Горкунов Э.С., Щербинин В.Е.* Магнитные методы контроля. Кн. 2. *Филинов В.Н., Кеткович А.А., Филинов М.В.* Оптический контроль. Кн. 3. *Матвеев В.И.* Радиоволновой контроль. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение, 2006. 848 с.
2. *Wolter B., Gabi Y., Conrad C.* Nondestructive Testing with 3MA—An Overview of Principles and Applications // *Applied Sciences*. 2019. V. 9. No. 6. P. 1068.
3. *Tomas I., Gabor V.* Magnetic Adaptive Testing. *Nondestructive Testing Methods and New Applications*. London: InTech Open Publ., 2012. 266 p.
4. IEC 60404-4:1995/AMD2-2008 Amendment 2 – Magnetic materials – Part 4: Methods of measurement of d.c. magnetic properties of magnetically soft materials.

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

© 2025 г. Михаил Юрьевич Федотов<sup>1,2\*</sup>, С.А. Бабин<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup> – *Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения РАН, 630090 Новосибирск, проспект Академика Коптюга, д. 1*

<sup>2</sup> – *Российская инженерная академия, 125009 Москва, Газетный пер., д. 9, стр. 4*  
\* - [fedotovmyu@gmail.com](mailto:fedotovmyu@gmail.com); \*\* - [babin@iae.nsk.su](mailto:babin@iae.nsk.su)

Композитные материалы и конструкции на их основе широко применяются в различных отраслях промышленности. Так, в изделиях транспортного, в частности, авиационно-космического комплекса, за последние двадцать лет сформировалась четкая тенденция, связанная с применением полимерных композитных материалов (ПКМ) на основе углеродных, стеклянных, арамидных, гибридных и иных армирующих структур, а также полимерных матриц, позволяющих изготавливать сложные конструктивные элементы автоклавными и безавтоклавными методами формования. Параллельно, например, в строительной отрасли продолжают активно применяться традиционные композитные материалы, такие как железобетон, который прекрасно зарекомендовал себя как универсальный конструкционный материал, обеспечивающий надежную эксплуатацию на многие десятилетия.

Однако композитные конструкции, как и любые другие, подвержены воздействию эксплуатационных факторов, которые в конечном итоге могут приводить к возникновению целого ряда дефектов, их накоплению и развитию и, как следствие, к снижению несущей способности, местной и полной потери устойчивости, частичному или полному разрушению. Поэтому важной практической задачей является прогнозирование их остаточного ресурса по результатам непрерывной диагностики технического состояния. Подобная задача может быть решена за счет применения современных методов непрерывного оптического неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики композитных конструкций [1, 2] в эксплуатации с использованием интегрированных [3] волоконно-оптических датчиков (ВОД) и аппаратно-программных средств их опроса.

Теоретические исследования показали, что наиболее эффективными являются:

- метод двух оптических волокон [4], позволяющий осуществлять одновременный НК деформации и температуры ПКМ встроенными ВОД на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР);

- метод, основанный на использовании комплексной системы ВОД на базе ВБР и ВОД акустической эмиссии на основе интерферометров Фабри-Перо, интегрированной в ПКМ, позволяющий осуществлять НК действующих напряжений [5];

- адаптированные к конкретным типам композитных конструкций методы оптической диагностики на основе ВОД, позволяющие обеспечить возможность НК композитных конструкций в экстремальных условиях эксплуатации (рис. 1).

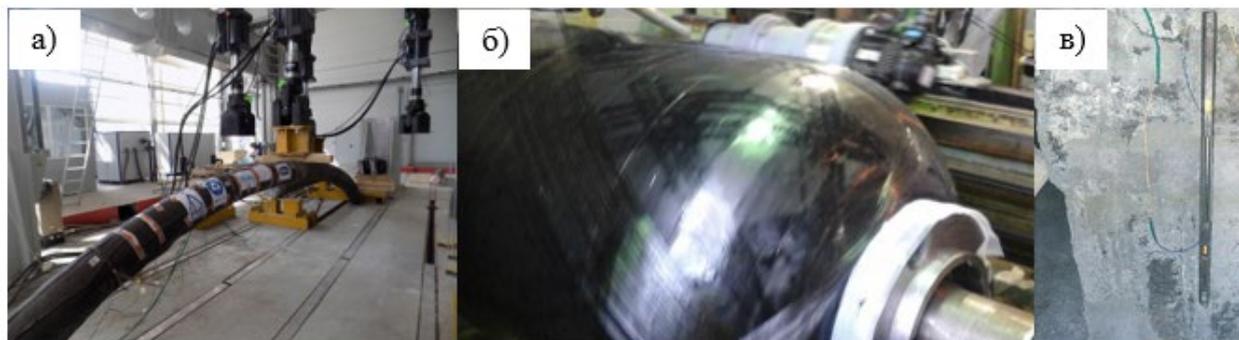


Рис. 1. Объекты НК с помощью ВОД: а) арочный элемент моста из ПКМ; б) баллон высокого давления из ПКМ; в) свайный фундамент (г. Норильск)

По результатам проведенных экспериментов подтверждено, что разработанные оптические методы и средства непрерывного оптического НК могут быть применены для диагностики широкого класса композитных конструкций, включая баллоны высокого давления из ПКМ, в том числе с металлическим лайнером, пространственных конструкций, регулярных зон оребренных и трехслойных конструкций из ПКМ, композитных арочных конструкций, железобетонных конструкций пролетных строений и опор мостов, свайных фундаментов в условиях Крайнего Севера.

*Исследование частично выполнено при финансовой поддержке Сибирского отделения РАН в рамках научно-исследовательских работ.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ромашко Р.В., Башков О.В., Ефимов Т.А., Безрук М.Н., Бобруйко Д.А., Макарова Н.В. Особенности применения адаптивных интерферометрических волоконно-оптических датчиков акустической эмиссии для контроля состояния полимерных композиционных материалов // Дефектоскопия. 2024. № 1. С. 21–27.
2. Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Чернова В.В. Локация сигналов акустической эмиссии от ударных воздействий на образец из углепластика при использовании антенн из пьезо- и волоконно-оптических датчиков // Дефектоскопия. 2022. № 4. С. 3–13.
3. Анискович В.А., Будадин О.Н., Козельская С.О. Кутюрин Ю.Г., Рыков А.Н., Склезнев А.А., Гнусин П.И., Юранев О.А. Интегрирование волоконно-оптических датчиков в композитный цилиндрический корпус из углепластика, изготовленный способом непрерывной намотки // Контроль. Диагностика. 2022. Т. 25. № 2(284). С. 16–23.
4. Fedotov M.Yu. Theoretical studies of temperature compensation of results of diagnostics of polymer composites using the method of two optical fibers // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2023. Vol. 59. No. 10. P. 1061–1073.
5. Федотов М.Ю., Бабин С.А., Будадин О.Н., Козельская С.О. Исследование возможности диагностики напряжений композитных конструкций на основе данных контроля деформации и акустической эмиссии интегрированными волоконно-оптическими датчиками // Контроль. Диагностика. 2024. Т. 27. № 9(315). С. 24–35.

# АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМОВ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ

© 2025 г. Сергей Григорьевич Сандомирский<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> – Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Академическая, 12

\* - sand\_work@mail.ru

Магнитные свойства сталей связаны с их фазовым составом (намагниченность  $M_s$  технического насыщения) и структурным состоянием (коэрцитивная сила  $H_c$ , остаточная намагниченность  $M_r$ ). Это – физическая основа магнитного структурного анализа [1]. Относительная погрешность  $\delta$  измерения  $H_c$  равна  $\pm 2\%$ ,  $\delta$  измерения  $M_r$  и  $M_s$  – не более  $\pm 3\%$ , а  $\delta$  отношения  $K_r = M_r/M_s$  не превышает  $\pm 1\%$  [2]. Для многих сталей  $H_c$  наиболее чувствительна к изменениям их структуры и механических свойств при термических обработках [3]. Но  $H_c$  оказалась не пригодна для контроля температуры  $T_t$  отпуска и твердости HRC закаленных изделий из сталей с содержанием углерода более 0,3 % (Табл. 1) из-за ее слабой и неоднозначной зависимости от  $T_t$  в области 350÷550 °С [3].

Таблица 1

**Магнитные свойства сталей 30 и 40X, отпущенных при температурах 350 оС ≤ T<sub>t</sub> ≤ 550 оС отпуска после закалки в масло от 860 °С по [3]**

| T <sub>t</sub> , °С | Сталь 30, Табл.1.1 в [3] |                      |                       |                       | Сталь 40X, Табл.26.2 в [3] |                      |                       |                       |
|---------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                     | HRC                      | H <sub>c</sub> , А/м | M <sub>r</sub> , кА/м | M <sub>s</sub> , кА/м | HRC                        | H <sub>c</sub> , А/м | M <sub>r</sub> , кА/м | M <sub>s</sub> , кА/м |
| 350                 | 41                       | 1130                 | 1070                  | 1650                  | 48                         | 1440                 | 852                   | 1651                  |
| 400                 | 38                       | 995                  | 1145                  | 1643                  | 46.5                       | 1320                 | 915                   | 1650                  |
| 450                 | 34                       | 873                  | 1248                  | 1645                  | 43                         | 1220                 | 1050                  | 1648                  |
| 500                 | 32                       | 876                  | 1265                  | 1648                  | 40                         | 1150                 | 1186                  | 1643                  |
| 550                 | 26                       | 866                  | 1277                  | 1639                  | 37                         | 1200                 | 1214                  | 1638                  |

Но многие ответственные изделия изготавливают из таких сталей, и изделия подвергают отпуску в этом интервале температур. Поэтому разработка достоверного метода неразрушающего контроля термической обработки изделий из таких материалов стала важной задачей магнитного структурного анализа. Предложенные для ее решения «релаксационные» (связанные с релаксационной коэрцитивной силой) параметры не нашли применения из-за большой погрешности и сложности измерений [4].

Для решения поставленной задачи воспользуемся предложенным в [4, 5] подходом к формированию параметров сталей, чувствительных к изменениям их структуры и физико-механических свойств, из параметров предельной петли магнитного гистерезиса.

Рассмотрим возможность использования для этого параметров, сформированных в [4-8] из результатов измерения  $H_c$  и  $K_r$  (которые могут быть измерены с минимальной по сравнению с другими магнитными параметрами относительной погрешностью  $\delta$ ):

$$H_0 = H_c / \operatorname{tg}(0,5\pi K_r); \quad H_{c1} = H_c(1 - K_r)^2; \quad H_k = H_c((1 - K_r)/K_r).$$

В докладе сопоставлены (рис. 1) результаты применения алгоритмов  $H_0$ ,  $H_{c1}$  и  $H_k$  для контроля температуры отпуска  $T_t$  среднеуглеродистых сталей 30 и 40X в практически важном диапазоне ее изменения  $350^\circ\text{C} \leq T_t \leq 550^\circ\text{C}$ .

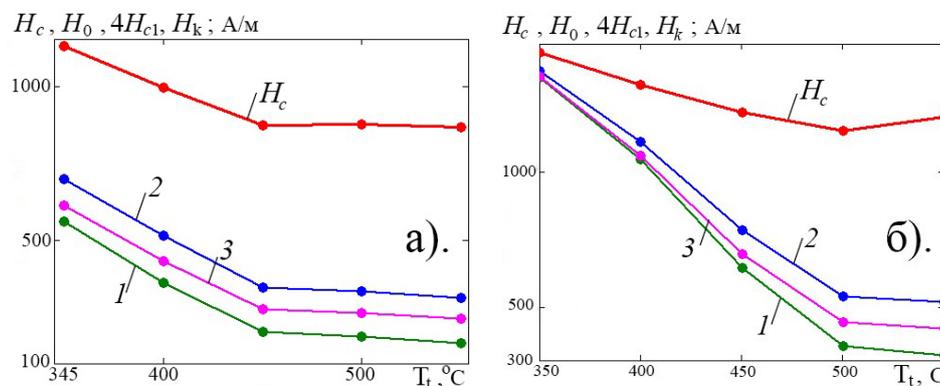


Рис. 1. Зависимость коэрцитивной силы  $H_c$  и алгоритмов  $H_0$  (1),  $H_{c1}$  (2) и  $H_k$  (3) сталей 30 (а) и 40X (б) от температуры  $T_t$  отпуска. Расчет по данным Табл. 1

Для расчета относительных погрешностей  $\delta$  параметров  $H_0$ ,  $H_{c1}$  и  $H_k$  в докладе использованы формулы [9] для погрешностей, вносимых алгебраическими операциями.

Однозначная монотонная связь с температурой отпуска и контролируруемыми физико-механическими свойствами и невысокая погрешность определения параметров  $H_0$ ,  $H_{c1}$  и  $H_k$  является физической предпосылкой их эффективного использования для магнитной структуроскопии среднеуглеродистых сталей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В.В. Клюев, В.Ф. Мужижкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. Неразрушающий контроль. Справочник: В 8 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.6: В 3 кн. Кн.1. Магнитные методы контроля. М.: Машиностроение, 2006. 848 с.
2. Чернышев Е.Т., Чечурин Е.Н., Чернышева Н.Г., Студенцов Н.В. Магнитные измерения. М.: Издательство стандартов, 1969. 248 с.
3. Бида Г.В., Ничипурук А.П. Магнитные свойства термообработанных сталей. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 218 с.
4. Клюев В.В., Сандомирский С.Г. Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей. М.: Изд. дом «СПЕКТР», 2017. 248 с.
5. Сандомирский С.Г. Использование параметров предельной петли гистерезиса для синтеза структурочувствительных магнитных параметров сталей // Контроль. Диагностика. 2017. № 11. С. 26–31.
7. Сандомирский С.Г. Анализ использования в магнитном структурном анализе сталей параметров, имеющих размерность напряженности магнитного поля // Сб. статей 9-й Межд. науч.-техн. конф. «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов», Могилев, 26-27 сентября, 2024. Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2024. С. 193–198.
8. Сандомирский С.Г. Статистический анализ и использование взаимосвязей между физико-механическими свойствами сталей и чугунов. Мн.: Беларуская навука, 2021. 144 с.
9. Мастяева И.Н., Семенихина О.Н. Численные методы: Учебное пособие. М.: Московский межд. институт эконометрики, информатики, финансов и права, 2004. 103 с.

## АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ПОЛЯ РАССЕЙЯНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО ОБЪЕКТА В СЛАБОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

© 2025 г. Александр Андреевич Неделько<sup>1\*</sup>, Н.В. Гречишкина<sup>1\*\*</sup>

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

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

подавляющее большинство ранений в ходе проведения СВО приходится на осколки, которые являются ферромагнитными. Поэтому логичным является применить магнитный метод их выявления, который позволяет неинвазивным способом определить их местоположение без использования рентгена, что особенно важно в полевых условиях. Для уверенного выявления осколков в теле человека их обнаружение необходимо проводить в приложенном магнитном поле. При этом магнитное поле не должно быть сильным, чтобы не притянуть осколок и не получить болевой эффект.

Чтобы перейти к расчету и проектированию магниточувствительного элемента, способного выявлять ферромагнитные осколки в теле человека, определимся с габаритными размерами расчетной модели осколка. За основу примем пулю диаметром 5,45 мм, длиной 25 мм. Для упрощения расчетов в качестве осколка рассмотрим объем прямоугольной формы, размером 25×5,5×5,5 мм, выполненный из стали 45 с величиной коэрцитивной силы от 640 А/см до 2160 А/см (после выстрела, что можно сравнить с процессом закалки) и с величиной остаточной индукции 1,12-1,8 Тл.

Согласно [1] остаточное поле ферромагнитного объекта контроля (ФОК) рассчитывается по следующей зависимости

$$M = M_0 + \chi_0 H,$$

где  $M_0$  – остаточная намагниченность на заданной магнитной характеристике материала ФТ;  $\chi_0$  – обратная магнитная восприимчивость на заданной магнитной характеристике материала ФОК.

Для расчёта намагниченности ФОК представим как совокупность поверхностных и объёмных зарядов [2], а при  $\text{div}\bar{M} = 0$  будем считать, что объёмные заряды отсутствуют, тогда скалярный потенциал источников поля определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi} \oint_S M_n \frac{dS}{|\bar{R}_Q - \bar{R}_p|},$$

где  $\bar{R}_Q - \bar{R}_p$  – векторы в точку источника и в точку наблюдения,  $S$  – площадь поверхности ФОК,  $M_n$  – нормальная составляющая поверхности ФОК вектора намагниченности.

Определим нормальную составляющую вектора магнитного поля, используя выражение [3]:

$$H_n = \frac{\partial \varphi}{\partial n} = \frac{1}{4\pi} \oint_S M_n \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{1}{|\bar{R}_Q - \bar{R}_P|} \right) dS - \frac{M_n}{2}.$$

Данное уравнение решается численным методом с использованием принятой прямоугольной модели ФОК. Поверхность исследуемой модели разбивается на элементарные площади, в пределах которых  $M_n = const$ .

Такой прием разбиения поверхности ФОК на элементарные площадки дает нам возможность заменить выше обозначенные интегральные уравнения системой линейных алгебраических уравнений [2, 3]:

$$\left\{ [A] + \frac{1}{\chi[1]} \right\} [M_n] = 2[H_{0n}],$$

$$\left\{ [A] + \frac{1}{\chi[1]} \right\} [M_n] = \frac{2[M_{0n}]}{\chi_0}.$$

Решая линейные алгебраические уравнения, определяем значения величины  $M_n$  для каждой элементарной площадки, что дает возможность рассчитать среднее значение нормальной составляющей для каждой грани ФОК.

Полученные значения намагниченности каждой грани ФОК позволяют нам рассчитать напряженность магнитного поля для всех составляющих ФОК на любом расстоянии от контролируемого объекта, что является необходимым условием для последующего проектирования ферромодуляционного магниточувствительного элемента. Применение феррозонда для определения местоположения осколка в теле человека обосновано рассчитанной величиной магнитного поля рассеивания ФОК от 5,47 А/м до 191,3 А/м на расстоянии 50 мм. Такая величина магнитного поля регистрируется ферромодуляционным преобразователем, работающим в режиме градиентометра. Размеры и параметры феррозонда рассчитываются исходя из полученного значения измеряемого магнитного поля.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тозони О.В., Майергойз И.Д. Расчет трехмерных электромагнитных полей. К.: Техника, 1974. 352 с.
2. Курбатов П.А., Аринчин С.А. Численный расчет электромагнитных полей М.: Энергоатомиздат, 1984. 164 с.
3. Крупин В.Г., Павлов А.Л., Попов Л.Г. Высшая математика. Уравнения математической физики. Сборник заданий: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 353 с.

## ПРИЧИНЫ ОТКАЗА РАБОЧИХ ЛОПАТОК ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА

© 2025 г. Данил Викторович Новгородов<sup>1\*</sup>, А.В. Михайлов<sup>2\*\*</sup>

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

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

В современном промышленном производстве газоперекачивающие агрегаты играют ключевую роль в обеспечении бесперебойной транспортировки газа.

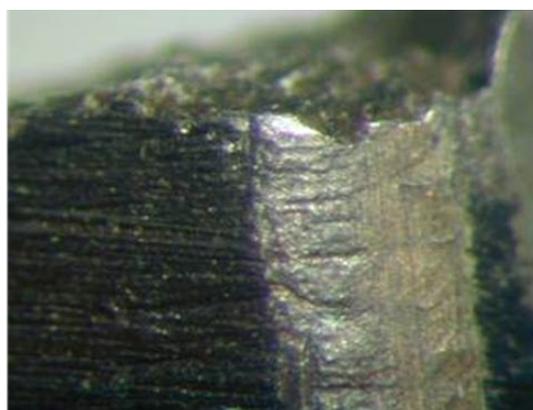
Данная работа посвящена исследованию отказов рабочих лопаток газоперекачивающего агрегата с использованием металлографических и фрактографических методов. Цель работы заключается в детальном изучении характера изломов и оценке качества материала лопаток в зоне их разрушения.

Исследование выполнялось с использованием методов спектрального анализа, оптической металлографии, сканирующей электронной микроскопии, твердометрии.

При визуальном осмотре установлено, что лопатки подвергались ремонтным операциям, таким как механическая зачистка и сварочно-наплавочное восстановление кромок пера (рис. 1). Обязательной процедурой любых ремонтных работ является предремонтный контроль, который включает в себя оценку состояния лопаток, выявление возможных дефектов и оценку степени износа.



а)



б)

Рис.1. Дефекты на поверхности лопаток;

а – следы механической зачистки, б – наплавленная кромка лопатки

Кроме того, контроль качества выполненного ремонта также играет ключевую роль в предотвращении дальнейших отказов. Таким образом, систематическое выполнение предремонтного контроля и контроль качества выполненного ремонта являются обязательными этапами, которые способствуют снижению рисков отказов лопаток в процессе их эксплуатации и увеличивают срок службы газоперекачивающих агрегатов.

В результате фрактографических исследований установлено, что причиной разрушения обеих лопаток является образование и развитие усталостной трещины в направлении от выходной кромки пера к входной кромке. Зарождение трещин (образование очага) произошло в приповерхностном слое металла выходной кромки по типу объёмного растрескивания от действия высоких нагрузок, соответствующих пределу прочности материала. Воздействие высоких нагрузок было кратковременным. Дальнейшее развитие трещин происходило под действием вибрационной нагрузки.

Особое внимание следует обратить на расплавление поверхности излома на участке межзеренного разрушения (рис. 2). Это обстоятельство может иметь несколько интерпретаций.

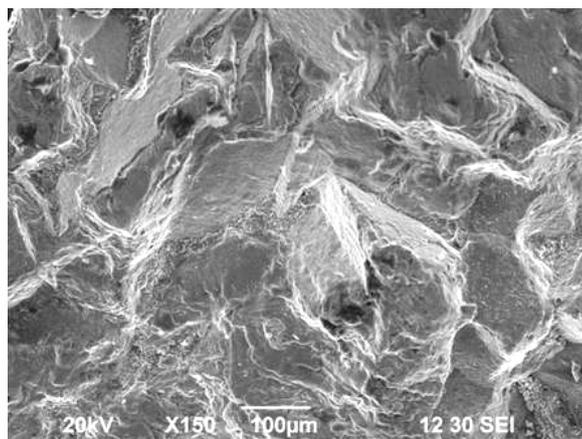


Рис. 2. Поверхность разрушения, натекание расплава на поверхности излома

Оплавление могло произойти до проведения ремонта. Это может говорить о недостаточной чувствительности проведённых диагностических процедур или о том, что существующие методы контроля не смогли обнаружить скрытые повреждения. Либо образование трещины и оплавление поверхности излома могло произойти в процессе ремонта. Таким образом, наличие оплавленной поверхности излома указывает на возможные недостатки в процессе диагностики или ремонта. Воздействие повышенной температуры после проведения ремонтных работ исключено, так как следы механической зачистки на поверхности лопаток не содержат оплавленных кромок.

В результате исследований сделано заключение, что вероятной причиной образования трещин в приповерхностном слое выходных кромок являлось проведение на лопатке термических (сварочно-наплавочных) ремонтных работ. Рекомендуется усовершенствовать технологические процессы предремонтного контроля, а также осуществлять тщательную проверку состояния объекта после завершения ремонтных работ.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.*

## КОМБИНИРОВАННОЕ КОРРОЗИОННОЕ ПОВРЕЖДЕНИЕ ГАЗОПРОВОДА

© 2025 г. Андрей Юрьевич Сурков<sup>1\*</sup>, Д.В. Новгородов<sup>1\*\*</sup>, С.В. Трапезников<sup>2\*\*\*</sup>,  
С.В. Баусов<sup>2\*\*\*\*</sup>, С.С. Кукушкин<sup>2\*\*\*\*\*</sup>

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

<sup>2</sup> – *ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург», Екатеринбург, ул. Клары Цеткин, д. 14  
\* - surkov@imp.uran.ru; \*\* - novgorodov@imp.uran.ru;*

*\*\*\* - S.Trapeznikov@ekaterinburg-tr.gazprom.ru; \*\*\*\* - S.Bausov@ekaterinburg-tr.gazprom.ru;  
\*\*\*\*\* - S.Kukushkin@ekaterinburg-tr.gazprom.ru*

Целью исследования являлось изучение причин возникновения комбинированного дефекта, совмещающего коррозионный и стресс-коррозионный характер повреждения металла трубопровода.

Среди множества видов коррозионной повреждаемости металла трубопроводов можно выделить наиболее распространенный и наиболее опасный. Наиболее распространенным коррозионным дефектом является язвенная коррозия, характеризующаяся появлением на поверхности отдельных или множественных пористых повреждений. Наиболее опасным дефектом, возникающим при эксплуатации магистральных газопроводов, безусловно, является коррозионное растрескивание под напряжением (КРН). Возникновение этого дефекта трудно спрогнозировать, а его рост влечет за собой потерю несущей способности стенки трубы, поэтому выявленные дефекты КРН подлежат устранению в большинстве случаев.

При обследовании в шурфе спиральношовной трубы диаметром 377 мм с толщиной стенки 6 мм был обнаружен редко встречающийся дефект в виде трещин, расположенных по дну коррозионных язв (рис. 1.).

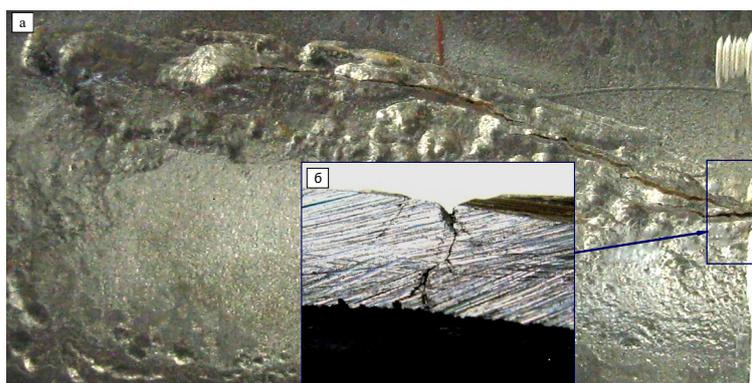


Рис. 1. Дефекты на поверхности фрагмента трубы.

а – общий вид зоны с трещиноподобным дефектом, б – поперечное сечение с трещинами

Ранее отмечалось отсутствие в одном месте одновременно коррозии и дефектов КРН, хотя и встречались случаи выявления мелких неразвивающихся трещин на фоне коррозии. Предполагается, что может происходить вырождение мелких дефектов КРН и превращение их в

общее коррозионное повреждение поверхности. Установление причин возникновения комбинации наиболее распространенного и наиболее опасного дефекта коррозионной повреждаемости поможет оценить его опасность для эксплуатирующей организации.

Уникальность обнаруженного дефекта может объясняться спецификой материала трубы, особыми условиями эксплуатации, а также может быть связано с особенностями язвенной коррозии или КРН, являющимися составными частями коррозионного повреждения металла трубопровода.

Анализ структуры металла поперечных шлифов в зоне трещин показал, что трещины глубиной около 4 мм имеют коррозионно-механическое происхождение. Выполнено фрактографическое исследование поверхности разрушения в трещинах, вскрытых для оценки характера их образования и развития (рис. 2).

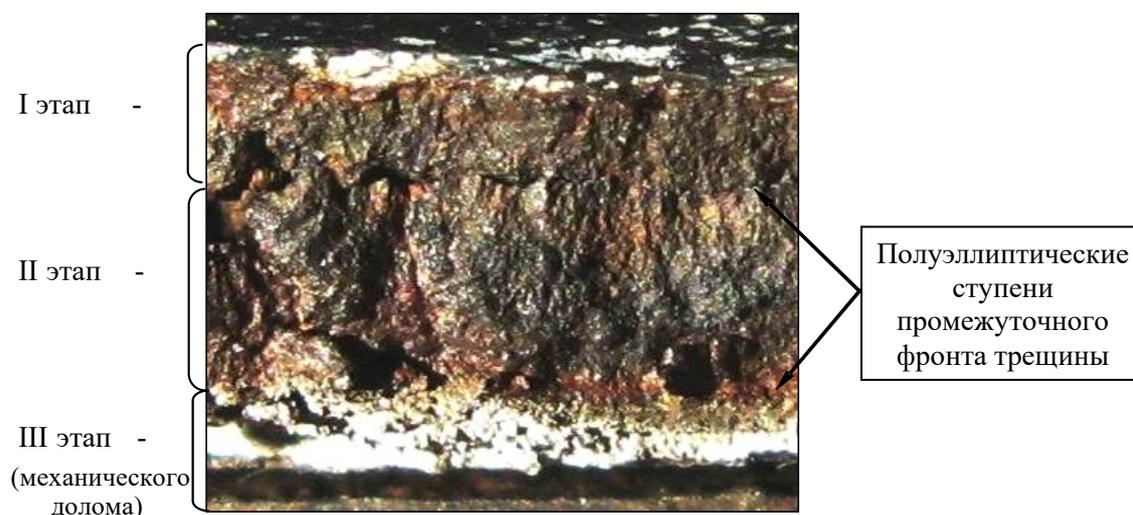


Рис. 2. Участок излома по типу коррозионного растрескивания под напряжением

Топография поверхности излома имеет типичные признаки для изломов по типу КРН, для которых характерны участки хрупкого роста трещин, покрытые плотной окисной пленкой коричневого цвета. Рост трещин происходил поэтапно, что выражается в полуэллиптических ступеньках, отмечавших промежуточное положение фронта трещины.

Таким образом причиной комбинирования различных типов повреждаемости в одном месте является последовательный коррозионный, а, после его завершения, стресс-коррозионный пути развития дефекта. Анодное растворение с образованием глубоких язв привело к снижению несущей способности и дальнейшему образованию трещин под действием кольцевых напряжений. Оценка опасности данного дефекта может производиться с использованием действующих методик.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.*

# СПОСОБ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ ПРЕССОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ МЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

© 2025 г. Сергей Алексеевич Бехер<sup>1\*</sup>, А.А. Попков<sup>1\*\*</sup>, В.Н. Федоринин<sup>2\*\*\*</sup>

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

<sup>2</sup> – *ИФП СО РАН, 630090 Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 13*

\* - *behers@mail.ru*; \*\* - *zabagy@mail.ru*; \*\*\* - *fedorinin55@mail.ru*

**Введение.** В промышленности и строительстве массово используются разъемные соединения деталей, неподвижность которых обеспечивается силами трения, формируемыми остаточными упругими напряжениями: прессовые соединения с натягом [1] и болтовые соединения [2]. В процессе эксплуатации под действием вибрации, ударов [3] и коррозии упругие напряжения уменьшаются [4], что снижает прочность соединений. Для контроля разъемных соединений их разбирают и заново монтируют. При этом актуальной задачей является разработка неразрушающих методов контроля разъемных соединений, что позволит снизить риски повреждений элементов при монтаже, стоимость и продолжительность плановых ремонтов.

**Целью работы** является доказательство возможности контроля прочности на основе решения обратной задачи о распределении упругих деформаций элементов соединений при локальном механическом нагружении за счет оценки внутренних напряжений трения.

**Описание конечно-элементной модели и эксперимента.** Моделирование и эксперименты проводились с образцами прессовых соединений колец подшипников 30-232726E2M по ГОСТ 18572-2014 с валами (диаметр 130 мм и высота 70 мм). Моделирование проводилось методом конечных элементов (рис. 1а) со средним размером тетрагональных элементов 11 мм и решением уравнений динамики. Для экспериментов были подготовлены образцы прессовых соединений с максимальными усилиями запрессовки 40, 80, 114, 127 кН и наклеенными на кольцо тензорезисторами типа 2ФКП-5-200-А-12-С (рис. 1б). Деформации измерялись тензометрическим комплексом «Динамика-3» (№ 66938-17) с частотой дискретизации АЦП 64 кГц и уровнем шумов в измерительном канале не более  $0,25 \text{ млн}^{-1}$  относительных деформаций. Схема нагружения образцов приведена на рис. 1.

**Анализ результатов и выводы.** Показана возможность создания на границе соединения локальных напряжений, превышающих напряжения трения, при которых возникает гистерезис в цикле «нагрузка-разгрузка», связанный с остаточными упругими деформациями на уровне (5-20) относительных единиц деформаций, и нелинейность деформаций элементов прессового соединения при нагрузке выше критической, но меньше усилия распрессовки.

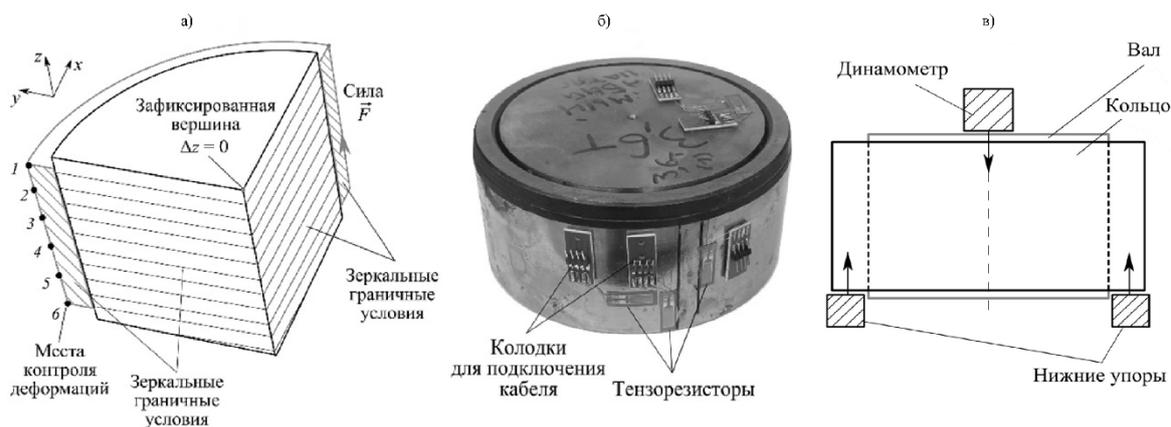


Рис. 1. Граничные условия конечно-элементной модели (а), образец с тензодатчиками (б) и схема локального нагружения прессового соединения (в)

Определены требования к схеме нагружения: для реализации тензометрического контроля испытательное усилие должно прикладываться локально, а места измерения деформаций должны быть максимально удалены от точек приложения силы и находиться вне линии действия силы. Экспериментально на образцах показана связь прочности прессового соединения с нагрузкой, при которой деформации отклоняются от линейной зависимости по уровню 10 %, и нагрузкой локального максимума деформаций с тензодатчика, установленного на границе сжатого и растянутого материала. Коэффициент корреляции обеих зависимостей составил 0,97.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-29-10110, <https://rscf.ru/project/23-29-10110/> и финансовой поддержке Правительства Новосибирской области.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Madej J., Sliwka M. Analysis of Interference-Fit Joints // Appl. Sci. 2021. No. 11. P. 11428. DOI 10.3390/app112311428.
2. Chen Y., Yamaguchi T., Hayashi G., Yamauchi M., Ueno K. Experimental study on long friction-type bolted joint combined with interference fit bolt // Advances in Bridge Engineering. 2024. No. 5:6. P. 1–20. DOI 10.1186/s43251-024-00117-5.
3. Букеткин Б.В., Семенов-Ежов И.Е., Ширшов А.А. Релаксация напряжений в болтовых соединениях с радиальным натягом // Инженерный журнал: наука и инновации. 2019. № 10(94). С. 1–10. DOI 10.18698/2308-6033-2019-9-1928.
4. Мамедов А.Ф. Расчет соединения с натягом на ударную нагрузку // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2019. № 4. С. 85–87.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ЭКВИВАЛЕНТОВ УДАРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОМПОЗИТАХ ПРИ РАЗРАБОТКЕ КОНТРОЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ В ТЕПЛОВИИ КОНТРОЛЕ

© 2025 г. В.П. Вавилов<sup>1\*</sup>, А.О. Чулков<sup>1\*\*</sup>, Олеся Алексеевна Ганина<sup>1\*\*\*</sup>

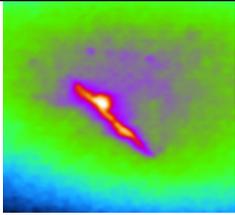
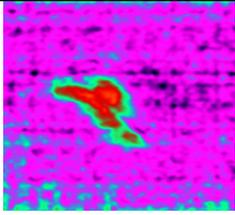
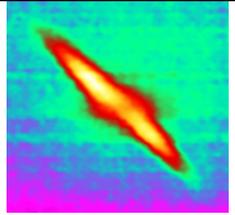
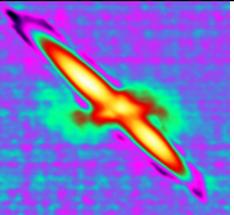
<sup>1</sup> – Национальный исследовательский Томский политехнический университет (НИ ТПУ), 634050  
Томск, пр. Ленина, д. 30

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

В данной работе были определены вид и параметры контрольных образцов для воспроизведения теплового отклика ударных повреждений, обеспечивающих тепловую эквивалентность реальных дефектов и их имитаторов. Эксперименты выполнены на образцах, описанных в [1]. Результаты ТК приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты ТК ударных повреждений в углепластике**

| Изделие   | Термограммы при одностороннем ТК  |   |  |   |
|---|---|---|--|---|
|   | Передняя поверхность (зона удара)   |   | Задняя поверхность   |   |
|   | Исходная термограмма  | Фазограмма Фурье  | Исходная термограмма   | Фазограмма Фурье  |
| Толщина 1,6 мм, энергия удара 62 Дж, скорость 6,8 м/с |  |  |  |  |

При энергии удара 62 Дж дефектная отметка имеет вытянутую форму в соответствии с растрескиванием композита вдоль волокон, причем фазограмма Фурье иллюстрирует форму «бабочки» в зоне дефекта на задней поверхности. Вид дефектной отметки зависит от энергии удара и от локальных свойств композита в точке удара [2].

Численное моделирование ТК выполнено с помощью программы ThermoCalc-3D. В качестве критерия сравнения выбран безразмерный температурный контраст  $C = \Delta T / T_{nd}$ . Приведенные в табл. 2 размеры плоскодонных дефектов определены путем многократного расчета различных дефектных ситуаций, в результате чего был получен экспериментальный профиль контраста  $C(\tau)$  (табл. 2) для передней и задней поверхностей [3, 4]. Экспериментальная проверка температурных откликов ударных повреждений и соответствующих плоскодонных дефектов в углепластиковом композите показала эффективность концепции тепловых эквивалентов дефектов при создании контрольных образцов в ТК и более эффективное проведение ТК со стороны, противоположной удару, что подтверждается результатами, приведенными в табл. 2.

**Моделирование плоскостонного теплового эквивалента ударного повреждения в углепластике толщиной 1,6 мм при одностороннем ТК и сравнение экспериментальных и теоретических результатов**

|  | Передняя поверхность | Задняя поверхность |
|--|----------------------|--------------------|
| Изменение температурного контраста над дефектом (эксперимент и теория)             |                      |                    |
| Конфигурация плоскостонного дефекта и пример ИК термограммы плоскостонного дефекта |                      |                    |

Тепловыми эквивалентами дефектов задней поверхности могут служить одиночные плоскостонные дефекты, обладающие идентичными температурными откликами в точках с максимальными сигналами (в «центре тяжести» дефектов). На передней поверхности конфигурация плоскостонных дефектов может быть более сложной, но во всех случаях плоскостонные дефекты могут иметь круглую или квадратную форму при условии одинаковой поперечной площади.

*Исследование выполнено в рамках государственного задания по проекту FSWW-2023-0004 Минобрнауки России.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вавилов В.П., Billard S., Айвазян В.М. Тепловой томограф для испытаний композиционных материалов // Дефектоскопия. 2014. № 11. С. 71–75.
2. Чулков А.О., Вавилов В.П., Нестерук Д.А., Бедарев А.М., Яркимбаев Ш., Шагдыров Б.И. Синтез данных активной инфракрасной термографии при оптической и ультразвуковой стимуляции изделий из углепластика сложной формы // Дефектоскопия. 2020. № 7. С. 54–60.
3. Umar MZ., Ahmad I., Vavilov V., Świdorski W., Hamzah AbR., Wan Abdullah WS. Developing methodology of pulsed thermal NDT of materials: Step-by-step analysis of reference samples // NDT.net – The e-Journal of Nondestructive Testing. 2008. [www.ndt.net/search/docs.php3?MainSource=25](http://www.ndt.net/search/docs.php3?MainSource=25).
4. Saeed N., Omar M.A., Abdulrahman Y., Dalem S. IR thermographic analysis of 3D printed CFRP reference samples with back-drilled and embedded defects // J. Nondestr. Eval. 2018. V. 37. Art. no. 59. <https://doi.org/10.1007/s10921-018-0512-2>.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСЛАБЛЕНИЯ УЗЛОВ КРЕПЛЕНИЯ ОПОР ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ИХ ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

© 2025 г. Алексей Николаевич Кожевников<sup>1\*</sup>, П.В. Ласточкин<sup>1</sup>, Т.В. Бурнышева<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup> – ФГБОУ ВО НГТУ, 630073 Новосибирск, пр. К. Маркса, д. 20

\* - [kozhevnikov.2010@corp.nstu.ru](mailto:kozhevnikov.2010@corp.nstu.ru); \*\* - [burnysheva@corp.nstu.ru](mailto:burnysheva@corp.nstu.ru)

Воздушные линии электропередачи (ВЛ) получили широкое распространение в системах передачи и распределения электрической энергии по всей территории Российской Федерации. Среди основных элементов этой сложной системы выделяют опоры ВЛ – металлические или железобетонные конструкции, поддерживающие проводники электрического тока на заданными нормативами высотах над поверхностью земли [1]. Среди неразрушающих методов контроля в настоящее время получает распространение определение технического состояния зданий и сооружений по периодам и декрементам собственных или свободных колебаний [2]. Данная работа посвящена исследованию чувствительности частот собственных колебаний к изменению условий закрепления решетчатых металлических опор ВЛ башенного типа на примере опор марки П110-3.

Для определения спектров частот собственных колебаний пространственных решетчатых конструкций применялся конечно-элементный комплекс ANSYS Mechanical. На встроенном языке программирования был реализован алгоритм автоматизированного построения расчетных дискретных моделей башенных конструкций [3]. Особенностью этого подхода является возможность учета типовых эксплуатационных повреждений объекта исследования. В рамках представленной работы рассматривается только некачественное соединение подпятника опоры с фундаментом. В некотором приближении такой дефект возможно рассматривать как общее ухудшение технического состояния бетонной опоры в грунте во время эксплуатации.

На этапе моделирования были определены как частоты собственных колебаний опоры в условиях жесткого закрепления по всем точкам заземления, так и при учете полного освобождения отдельного опорного узла от связей. Результаты удобно представить в виде сводной таблицы (табл. 1). Однако полученные численно результаты требуют экспериментального подтверждения. Для этой цели была разработана имитационная модель решетчатой опоры ВЛ марки П110-3. Данная модель не является полным аналогом или динамическим демонстратором реальной конструкции, но имеет качественно такой же спектр частот собственных колебаний, что и реальная опора П110-3: в порядке возрастания присутствуют балочные безузловые формы изгибных колебаний, крутильная и более высокие одноузловые изгибные колебания опоры [4].

На модельной конструкции был внесен дефект, аналогичный расчетному случаю – выполнено ослабление крепления одного из подпятников к силовому полу зала статических испытаний конструкций ФГБОУ ВО НГТУ. С применением анализатора частот колебаний конструкций башенного типа «ЛЭПТОН-1» определялись спектры свободных колебаний в исходном и в поврежденном состоянии (табл. 1).

Таблица 1

**Сводные результаты расчетного и экспериментального исследований**

| Номер частоты | Опора П110-3 (расчет) |            |            | Имитационная модель (эксперимент) |            |            |
|---------------|-----------------------|------------|------------|-----------------------------------|------------|------------|
|               | Частота колебаний, Гц |            | Разница, % | Частота колебаний, Гц             |            | Разница, % |
|               | исходная              | с дефектом |            | исходная                          | с дефектом |            |
| 1             | 2.9504                | 2.1939     | -25.64     | 7.73                              | 5.22       | -32.47%    |
| 2             | 2.9541                | 2.9522     | -0.06      | 9.04                              | 8.03       | -11.17%    |

В результате выполненной работы показано, что освобождение от закрепления одного из крепежных узлов конструкции опоры ВЛ П110-3 и ее имитационной модели приводит к схожим изменениям в значениях низших частот собственных изгибных колебаний. Отличие может быть обусловлено качеством изготовления самой имитационной модели или отдельных ее опорных узлов. Дальнейшие исследования целесообразно проводить для исследования влияния качества закрепления других опорных точек и их комбинаций на динамические параметры сооружений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ПУЭ. Правила устройства электроустановок. Издание 7.
2. ГОСТ 31937 – 2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.
3. *Kozhevnikov A.N., Krasnorutskiy D.A., Levin V.E.* Development of subroutine for automatic building of finite-element models of typical metal pylons of air power transmission lines // International conference on mechanical engineering, automation and control systems (MEACS). 2015. IEEE, 2015. 4 p.
4. *Кожевников А.Н., Красноруцкий Д.А.* Определение частот малых колебаний опоры линии электропередачи в среде ANSYS // Наука. Промышленность. Оборона: труды 15-й Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 23-25 апреля, 2014. С. 308–311.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ  
МОЛОДЕЖНОЙ СЕКЦИИ

## ВЛИЯНИЕ ДВУХОСНОГО РАСТЯЖЕНИЯ НА МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАСТАБИЛЬНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ

© 2025 г. Кристина Денисовна Малыгина<sup>1\*</sup>, А.Н. Мушников<sup>1\*\*</sup>,  
А.М. Поволоцкая<sup>1,2\*\*\*</sup>, Л.С. Горулева<sup>1\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – ИМАШ УрО РАН, 620066 Екатеринбург, ул. Комсомольская, д. 34

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

\* - [kristina.kryucheva@mail.ru](mailto:kristina.kryucheva@mail.ru); \*\* - [mushnikov@imach.uran.ru](mailto:mushnikov@imach.uran.ru);

\*\*\* - [povolotskaya@imp.uran.ru](mailto:povolotskaya@imp.uran.ru); \*\*\*\* - [sherlarisa@mail.ru](mailto:sherlarisa@mail.ru)

Разработка надежных методов контроля напряженно-деформированного состояния деталей и элементов конструкций из металлических материалов является важной задачей неразрушающего контроля. При этом активное применение находят магнитные виды контроля, основой для использования которых служат установленные взаимосвязи между магнитными свойствами материала и параметрами их напряженного состояния. В конструкциях ответственного назначения, к которым предъявляются повышенные требования к эксплуатационным характеристикам, широко используются аустенитные стали. Как известно, фазовый состав данных сталей в результате воздействия различных нагрузок может меняться вследствие фазового перехода «аустенит – мартенсит деформации», что влечет за собой снижение пластичности и коррозионной стойкости стали и в дальнейшем может служить причиной ее разрушения. В литературе достаточно полно представлены экспериментальные результаты эволюции магнитных характеристик аустенитных сталей в условиях деформационных воздействий [1-3], однако работы, в которых внимание было бы сосредоточено на рассмотрении данного вопроса при двухосном растяжении, отсутствуют. В связи с этим представляет интерес изучение влияния упругопластического деформирования по схеме двухосного растяжения на магнитные и электромагнитные характеристики метастабильной аустенитной стали.

Объектом исследования служила метастабильная аустенитная сталь 12Х18Н10, используемая для изготовления сварных сосудов, аппаратов, испытывающих сложное нагруженное состояние в процессе эксплуатации. Эксперименты проводили на уникальной испытательной машине, созданной в ИМАШ УрО РАН и предназначенной для двухосного деформирования [4]. Для испытаний были изготовлены крестообразные образцы. Измерения магнитных характеристик, а также параметров магнитных шумов Баркгаузена проводили в центральной зоне крестообразного образца с использованием приставных магнитных устройств, при этом измерения осуществляли в двух направлениях: вдоль каждой из осей приложения нагрузки  $x$  и  $y$ . Параметры вихретокового сигнала (амплитуду и фазовый угол) определяли при различных частотах возбуждения преобразователя, используя вихретоковый дефектоскоп

“Вектор”. Измерения магнитных и электромагнитных характеристик проводили после каждого этапа нагружения и последующей разгрузки.

При помощи видеоэкстензометра рассчитывали компоненты тензора деформаций ( $\epsilon_{ij}$ ) в центральной зоне образца. В качестве степени деформации материала подразумевали эквивалентные деформации по Мизесу:

$$\epsilon_{\text{эке}} = \frac{1}{1+\nu} \sqrt{\epsilon_{xx}^2 + \epsilon_{yy}^2 + \epsilon_{zz}^2 - \epsilon_{xx}\epsilon_{yy} - \epsilon_{xx}\epsilon_{zz} - \epsilon_{yy}\epsilon_{zz} + \frac{3}{4}(\epsilon_{xy}^2 + \epsilon_{xz}^2 + \epsilon_{yz}^2)},$$

где коэффициент Пуассона  $\nu$  принимали равным 0,3, а деформациями по  $z$  пренебрегали.

Анализ поведения магнитных характеристик метастабильной аустенитной стали 12X18H10 при двухосном симметричном деформировании растяжением показал, что зависимости магнитных характеристик от степени эквивалентной деформации имеют качественно одинаковый характер изменения при измерениях в направлениях обеих осей приложения нагрузки. Установлено, что такие магнитные характеристики, как коэрцитивная сила, максимальная магнитная проницаемость, остаточная индукция, максимальная намагниченность, а также амплитуда вихретокового сигнала образцов из стали 12X18H10 демонстрируют монотонное возрастание по достижении степени эквивалентной деформации примерно 7,5 %, что связано с образованием мартенсита деформации и увеличением количества этой фазы.

*Работа выполнена в рамках государственных заданий Минобрнауки России для ИМАШ УрО РАН и ИФМ УрО РАН. При выполнении работы было использовано оборудование ЦКП «Пластометрия» при ИМАШ УрО РАН.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Корх М.К., Ригмант М.Б., Сажина Е.Ю., Кочнев А.В. Измерение содержания ферромагнитной фазы по магнитным свойствам в двухфазных хромоникелевых сталях // Дефектоскопия. 2019. Т. 55. № 11. С. 32–44.
2. Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Путилова Е.А., Поволоцкая А.М., Горулева Л.С., Веретенникова И.А., Каманцев И.С. Использование магнитного структурно-фазового анализа для диагностики состояния композиционного материала “сталь 08X18H10Т - сталь Ст3” и составляющих его компонент, подвергнутых пластической деформации // Дефектоскопия. 2012. Т. 48. № 6. С. 30–43.
3. Кочнев А.В., Ригмант М.Б., Корх М.К., Гордеев Н.В., Матосян А.М. Мониторинг изменения относительной магнитной проницаемости при циклических испытаниях на изгиб образцов из аустенитной стали 10X18H10Т // Дефектоскопия. 2024. Т. 60. № 9. С. 52–56.
4. Mushnikov A.N., Zadvorkin S.M., Perunov E.N., Vyskrebencev S.V., Izmajlov R.F., Vichuzhina D.I., Soboleva N.N., Igumnov A.S. Experimental Facility for Studying the Physical Properties of Materials in a Plane Stress State // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2022. Iss. 4. P. 50–60.

## МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ПЛОТНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ПОКРЫТИЙ

© 2025 г. Мария Вячеславовна Шипицына<sup>1\*</sup>, А.Е. Тюрнина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – Уральский научно-исследовательский институт метрологии — филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», 620075 Екатеринбург, ул. Красноармейская, д. 4

\* - [ShipitsynaMV@uniim.ru](mailto:ShipitsynaMV@uniim.ru)

Определение толщины металлических покрытий является неотъемлемой задачей на различных стадиях технологического процесса в аэрокосмической, автомобильной промышленности, в области микроэлектроники и в машиностроительном комплексе [1].

Одним из самых распространенных бесконтактных методов измерений толщины металлических покрытий является метод рентгенофлуоресцентного анализа (РФА). Данный метод не требует специальной предварительной подготовки образцов, время измерений толщины покрытий является минимальным, локальность измерений до 50 мкм.

РФА является косвенным методом определения толщины покрытий, значение которой определяется с помощью измеренного значения поверхностной плотности покрытия и значения плотности материала нанесенного покрытия, которое до настоящего времени являлось справочным из-за отсутствия методических подходов при измерении плотности материалов покрытий. Суть обсуждаемой проблемы: использование справочного значения плотности материалов покрытий может приводить не только к увеличению неопределенности измерений толщины покрытий методом РФА, но и к искажению результата измерений толщины покрытий в целом. Основными проблемами при нанесении покрытий, особенно покрытий толщиной более 10 мкм, являются неравномерность нанесения покрытий и образование пористости ввиду захвата водорода и защитного газа в процессе нанесения покрытия [2]. Также при разработке технологий нанесения покрытий необходимо знать их параметры, контролируя плотность наносимых покрытий [3].

Цель работы – разработка методики количественного определения плотности покрытий для дальнейшего совершенствования измерений толщины покрытий методом РФА. Предложена физико-математическая модель измерений плотности материалов нанесенных покрытий на основе гидростатического взвешивания [4].

Проведено исследование влияющих факторов предложенной модели измерений как в части конструктивного исполнения установки для гидростатического взвешивания, так и в части оценки внешних факторов при выполнении измерений.

Были рассчитаны неопределенности, связанные с инструментальной составляющей, плотностью окружающего воздуха и плотностью рабочей жидкости. Основные вклады в неопределённость измерений, связанные с действием сил поверхностного натяжения и дрейфом

температуры рабочей жидкости, были минимизированы за счет использования рабочей жидкости с низким поверхностным натяжением, подвеса в виде проволоки диаметром 0,1 мм и отсутствия температурных флуктуаций рабочей жидкости [5].

Для валидации разработанной методики измерений были проведены предварительные экспериментальные исследования плотности материалов моделей покрытий, представляющие собой различные металлические фольги и образцы произвольной формы. Были выбраны модели покрытий, имитирующие толщину покрытий от 1 до 30 мкм. Полученные результаты измерений были сопоставлены с результатами прямых измерений плотности моделей покрытий неправильной геометрической формы методом гидростатического взвешивания, моделей покрытий правильной геометрической формы – гравиметрическим методом.

Проведенные исследования моделей покрытий доказали реализуемость предложенной физико-математической модели измерений плотности металлических покрытий и позволили установить параметры для дальнейшего изготовления стандартных образцов толщины металлических покрытий, необходимых для поверки, калибровки и градуировки средств измерений толщины покрытий, основанных на рентгенофлуоресцентном анализе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Потапов А.И., Сясько В.А.* Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий. Научное, методическое и справочное пособие. Санкт-Петербург: Гуманистика, 2009. 904 с.
2. *Подымова Н.Б., Соколовская Ю.Г.* Неразрушающий ультразвуковой контроль пористости алюминиевых покрытий лазерным оптико-акустическим методом // Контроль. Диагностика. 2025. Т. 28. № 1. С. 49–55.
3. *Сильченко О.Б., Силуянова М.В., Хопин П.Н.* Исследование плотности и пористости покрытий из керамополимеров или композиционных материалов с квазикристаллами, полученных газодетонационным методом и методом газодинамического напыления // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020. № 7. С. 4–11.
4. *Шипицына М.В., Тюрнина А.Е.* О состоянии и перспективах совершенствования метрологического обеспечения в области измерений толщины покрытий рентгенофлуоресцентным методом // Эталоны. Стандартные образцы. 2024. Т. 20. № 4. С. 103–116.
5. *Баковец Н.В., Козадаев К.В.* Стабилизация температурных условий при определении плотности жидкости методом гидростатического взвешивания // Приборы и методы измерений. 2024. Т. 15. № 4. С. 334–341.

# ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ТИПА НЕСПЛАВЛЕНИЙ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ДУГОВЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДА В РАЗДЕЛКЕ

© 2025 г. Дарья Сергеевна Бузорина<sup>2\*</sup>, А.Е. Филяков<sup>3</sup>, А.Ю. Мельников<sup>2</sup>,  
М.А. Шолохов<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> – УрФУ, 620062 Екатеринбург, ул. Мира, д. 19

<sup>3</sup> – ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана», 105005 Москва, пер. Госпитальный, д. 4

\* - [d.s.buzorina@urfu.ru](mailto:d.s.buzorina@urfu.ru)

При автоматической многопроходной дуговой сварке плавящимся электродом, в том числе при строительстве магистральных трубопроводов, наиболее часто возникающими дефектами являются различного рода несплавления: несплавления по кромке, межслойные несплавления. Одной из основных причин образования несплавлений является **нарушение в позиционировании электрода относительно боковых сторон разделки кромок** при поперечных колебаниях электрода в разделке стыка [1]. К сожалению, подобные дефекты выявляются уже после завершения сварочных работ методами неразрушающего контроля.

Проведенные исследования показали, что при смещении электрода от оси колебаний возникает несимметричность высоты заполнения разделки, при этом у более низкой части слоя формируется незаполненная электродным металлом продольная канавка, а у более высокой части слоя, на поверхности образуются неровности в виде поперечных углублений. Все это при сварке следующего прохода приводит к образованию несплавлений (рис. 1).

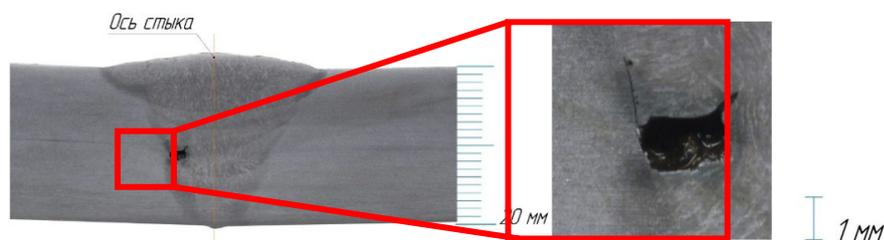


Рис. 1. Макрошлиф сварного соединения с дефектом, возникающим при смещении оси колебаний от оси стыка на 4 мм

Наиболее эффективным методом предотвращения возникновения подобных дефектов является обеспечение определенного соотношения между шириной заполнения разделки и амплитудой колебаний, а также контроль за симметричностью поперечных колебаний относительно разделки стыка и за расстоянием от плавящегося электрода до боковой поверхности металла разделки непосредственно в процессе сварки.

В системе адаптивной коррекции перемещений плавящегося электрода в разделке целесообразно использовать саму сварочную дугу в качестве датчика (сенсора) ее положения в разделке [2]. Оценка фактического положения электрода в разделке должна осуществляться на основе совместного анализа фаз колебаний горелки и фаз динамических изменений тока и

напряжения дуги.

Для исследования влияния параметров колебаний и геометрии разделки на колебания тока и напряжения дуги использована динамическая нелинейная физико-математическая модель, решение системы уравнений которой позволило воспроизводить микроцикл горения дуги при перемещении горелки от плоскости симметрии к кромке. **Результаты моделирования показывают существенное изменение характера колебаний длины дуги, напряжения и сварочного тока (рис. 2) [3].**

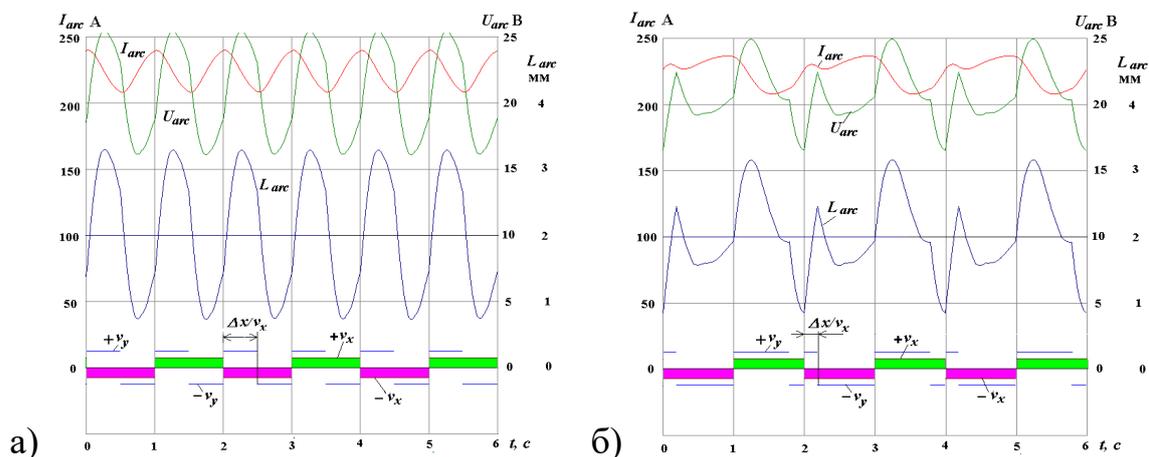


Рис. 2. Изменение параметров горения дуги при сварке с поперечными колебаниями электрода: а) при симметричном расположении горелки в стыке; б) при смещении центра колебаний от плоскости симметрии стыка на  $\Delta x$

**Наиболее значимым является возникновение в колебаниях тока и напряжения гармонической составляющей, период которой совпадает с периодом поперечных колебаний горелки. Фаза этой составляющей, зависящая от направления смещения центра колебаний горелки относительно плоскости симметрии стыка, и амплитуда колебаний, определяемая величиной смещения, позволяют получить сигнал для корректировки положения горелки в разделке, обеспечивающий слежение за стыком при сварке.**

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Филяков А.Е., Полосков С.И., Ерофеев В.А., Шолохов М.А.* Исследование влияния отклонений параметров колебаний плавящегося электрода на образование несплавлений при многопроходной сварке трубопроводов // Сварка и диагностика. 2021. № 2. С. 47–53.
2. *Шолохов М.А., Ерофеев В.А., Полосков С.И.* Система коррекции положения плавящегося электрода с использованием дуги в качестве датчика для автоматической сварки продольных швов по узкому зазору // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 8. С. 7–10.
3. *Шолохов М.А., Полосков С.С., Ерофеев В.А., Бузорина Д.С., Мельников А.Ю.* К вопросу повышения точности при использовании дуговых датчиков для позиционирования плавящегося электрода в разделке // Сварка и диагностика. 2024. № 4. С. 39–44.

## БЕСКОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ

© 2025 г. Вадим Николаевич Перов<sup>1\*</sup>, В.Н. Костин<sup>1</sup>

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

\* - *perovadim22@gmail.com*

Измерение магнитострикции и магнитострикционных параметров ферромагнитных материалов не теряет своей актуальности. Магнитострикция определяет эффективность электромагнитно-акустического преобразования [1] и лежит в основе формирования низкочастотной области спектра колебаний магнитоакустической эмиссии.

В настоящее время развивается электромагнитно-акустическая дефектоскопия, соответственно, актуальным является определение магнитострикционных параметров реальных и объемных ферромагнитных объектов, которые применяются в промышленности, например, стальные трубы и рельсы. Кроме того, измерение упругих колебаний, возникающих при перемагничивании, необходимо и полезно для применения при структуроскопии ферромагнитных материалов.

Для отработки методики бесконтактного измерения магнитострикционных характеристик [2] были выбраны образцы, изготовленные из трубных сталей разных марок и вырезанные из магистральных трубопроводов диаметром 1420 и 1020 мм. Конечные размеры всех образцов составили 85×6×4 мм. Дополнительно была произведена обработка торцевых поверхностей образцов.

Для измерения упругих колебаний, возникающих при перемагничивании, образцы закреплялись в держателе из дюралюминия и латуни, позволяющем зажимать образцы с помощью двух винтов с упором одной из торцевых поверхностей образца. Закрепленный образец помещался в соленоид с исключением контакта между держателем и стенками соленоида. Бесконтактное измерение магнитострикционного изменения размеров образцов производилось с помощью лазерного сканирующего виброметра PSV-500-HV (Polytec GmbH, Германия). Лазерный луч виброметра направлялся на свободную торцевую поверхность образца и производилась настройка и фокусировка луча лазера. Измерение колебаний осуществляли в режиме быстрого преобразования Фурье с регистрацией спектра колебаний в полосе частот от 4 до 10 Гц.

Переменное магнитное поле  $H_r$  соленоида изменялось по синусоидальному закону с частотой  $f_r = 4,5$  Гц, выбор такой частоты объясняется необходимостью получения наибольшей амплитуды магнитострикционных колебаний [3]. Измерения проводили в неоднородном поле, так как область однородного поля составляла не более 0,5 см. Напряженность переменного магнитного поля изменялась в диапазоне от 700 до 15500 А/м.

На рис. 1 приведены полученные полевые зависимости магнитострикционного изменения размеров образцов из трубных сталей.

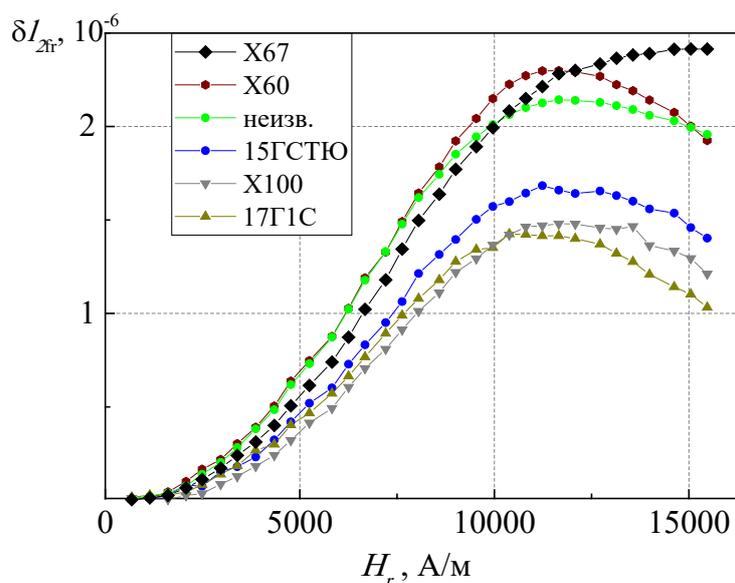


Рис. 1. Полевые зависимости амплитуды изменения размеров образцов  $\delta l_{2fr}$  трубных сталей различного химического состава, измеренные с помощью лазерного виброметра

Как следует из рис. 1, максимальные амплитуды изменения размеров образцов при перемагничивании находятся в диапазоне  $H_r$  от 11 до 12 кА/м, исключение составляет образец класса X67, который и к  $H_r > 15$  кА/м не достигает своего насыщения. Похожее поведение зависимости наблюдалось и для других сталей, в частности 09Г2 [2], что вероятно связано со скин-эффектом и малой областью однородности магнитного поля.

Исследуемые стали имеют схожие химические составы, с добавлением кремния и марганца в различном количестве ( $\sim 0,3$  и  $1,5$  % соответственно), для образцов класса X67 и X60 характерно большее количества никеля ( $\sim 0,5$  %) по сравнению с другими сталями.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН и молодежного научного проекта ИФМ УрО РАН № М8-24.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Wang P., Li Y., Yao E., Chady T., Shi Y., Han F. Method of measuring the mechanical properties of ferromagnetic materials based on magnetostriction EMAT and sound velocity // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2022. V. 555, No. 7. P. 169375.
2. Сербин Е.Д., Перов В.Н., Костин В.Н. Бесконтактное измерение динамических магнитострикционных параметров ферромагнетиков // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2023. № 6. С. 121–131.
3. Костин В.Н., Филатенков Д.Ю., Чекакина Ю.А., Василенко О.Н., Сербин Е.Д. Особенности возбуждения и регистрации магнитоакустической эмиссии в ферромагнитных объектах // Акустический журнал. 2017. Т. 63. № 2. С. 209–216.

## МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ОТОЖЖЁННОЙ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ, УПРУГО ДЕФОРМИРОВАННОЙ ИЗГИБОМ

© 2025 г. Антон Михайлович Матосян<sup>1\*</sup>, А.Н. Сташков<sup>1\*\*</sup>, А.П. Ничипурук<sup>1</sup>,  
Н.В. Гордеев<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*

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

Контроль механических напряжений позволяет обеспечивать надежность и долговечность различных конструкций и изделий. Это особенно важно в таких отраслях, как машиностроение, строительство, а также авиационная и космическая промышленность. Своевременное выявление критических напряжений в стальных объектах позволяет предотвратить аварийные ситуации и продлить срок службы оборудования. Таким образом, контроль напряжений с помощью неразрушающих методов представляет собой важную научно-техническую задачу. В работах [1, 2] был предложен подход для оценки механических напряжений, основанный на измерении полей смещения 90-градусных доменных границ, чувствительных к механическим напряжениям сжатия в низкоуглеродистых сталях, подвергнутых одноосному растяжению и сжатию. Цель данной работы – исследование влияния упругой деформации изгибом на поведение кривых обратимой магнитной проницаемости стали 20.

Пластина из стали 20 с размерами 650×59×5,6 мм предварительно отжигалась при 700 °С в течение 1 часа. Концы пластины располагались на опорах. К центру пластины подвешивались различные грузы массами 19, 32 и 55 кг, под действием которого она упруго изгибалась. Перемагничивание центрального участка пластины по предельной петле гистерезиса производилось с помощью приставного П-образного электромагнита (ПЭМ). Для измерения тангенциальной составляющей поля  $H$  на поверхности контролируемой пластины использовался датчик холла. В межполюсном пространстве ПЭМ располагался индукционный преобразователь. Частота возбуждения варьировалась в диапазоне от 30 до 10000 Гц. Сигнал измерительной катушки ВТП  $U$ , пропорциональный обратимой магнитной проницаемости, измерялся селективным вольтметром.

Индикатором присутствия механических напряжений в образце является появление дополнительного перегиба на полевых зависимостях обратимой магнитной проницаемости (рис. 1). Испытания проводились при различных нагрузках и одной частоте подмагничивающего поля, а также при одной нагрузке и разных частотах подмагничивающего поля. Благодаря используемой схеме нагружения механические напряжения в пластине неоднородны. С верхней стороны пластина на поверхности испытывает максимальные механические напряжения сжатия,

с приближением к средней линии напряжения уменьшаются и после снова увеличиваются, но с обратным знаком.

Установлено, что при увеличении нагрузки расстояние между критическими полями необратимого смещения 90-градусных доменных границ линейно растет с увеличением нагрузки. С помощью изменения частоты подмагничивающего поля при неизменной нагрузке можно увеличивать или уменьшать глубину проникновения вихревых токов, тем самым изменяя зону контроля. Измерения проводились на частотах 30, 40, 240, 300, 1000, 5000, 10000 Гц. Расстояние между критическими полями уменьшалось с уменьшением частоты до 300 Гц, однако дальнейшее снижение частоты привело к росту расстояния между пиками. Это можно объяснить тем, что на низких частотах вихревые токи захватывают часть пластины, испытывающей растяжение.

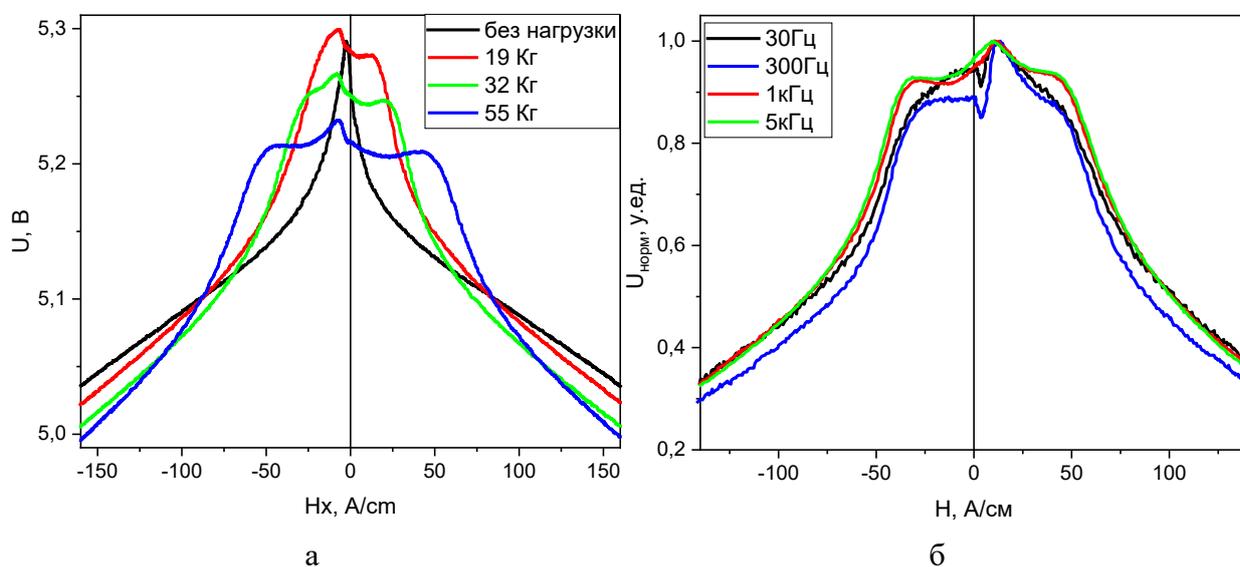


Рис. 1. Полевые зависимости обратимой магнитной проницаемости: а) при различии нагрузке; б) при различной частоте возбуждения

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ничитурук А.П., Сташков А.Н., Кулеев В.Г., Щапова Е.А., Осипов А.А. Методика и устройство для безградуировочного определения величины остаточных сжимающих напряжений в деформированных растяжением низкоуглеродистых сталях // Дефектоскопия. 2017. № 11. С. 20–27.
2. Ничитурук А.П., Розенфельд Е.В., Огнева М.С., Сташков А.Н., Королев А.В. Экспериментальный метод оценки критических полей смещающихся доменных границ в пластически деформированных растяжением проволоках из низкоуглеродистой стали // Дефектоскопия. 2014. № 10. С. 18–26.

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПСЕВДОИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ КОРУНДА ДЛЯ СОЗДАНИЯ РАДИАЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ТОНКИХ СЛОЕВ

© 2025 г. Андрей Денисович Петракович<sup>1\*</sup>, А.И. Сюрдо<sup>1\*\*</sup>, Р.М. Абашев<sup>1\*\*\*</sup>

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

\* - [petrakovich2007.an@yandex.ru](mailto:petrakovich2007.an@yandex.ru); \*\* - [surdo@imp.uran.ru](mailto:surdo@imp.uran.ru); \*\*\* - [abashevrn@imp.uran.ru](mailto:abashevrn@imp.uran.ru)

Для накопительной кожной и глазной дозиметрии ионизирующих излучений, использующей для считывания дозиметрической информации эффект оптически стимулированной люминесценции (ОСЛ), требуются детекторы с тонким радиационно-чувствительным ОСЛ-активным слоем массовой толщиной 5 мг/см<sup>2</sup>. Ранее при создании таких слоев у люминесцентных детекторов на основе кристаллов корунда ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) для кожной дозиметрии использовались сканирующие непрерывные и импульсные СО<sub>2</sub>-лазеры [1, 2]. В обоих случаях создавался люминесцентно-активный и радиационно-чувствительный слой на поверхности детекторов  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> толщиной 10-12 мкм или 5 мг/см<sup>2</sup>. Если применялось импульсное воздействие, то на поверхности создавались кратеры, периферия которых оказывалась люминесцентно-активной [2]. При импульсном воздействии в отличие от непрерывного ОСЛ-выход оказывался в 3-5 раз выше, но у таких образцов появлялись трещины, часто приводящие к их растрескиванию, а, следовательно, к ухудшению эксплуатационных характеристик детекторов. Поэтому требовался поиск новых способов лазерной обработки, способствующих получению на поверхности детекторов из  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> тонких слоев с повышенным ОСЛ-выходом и с достаточной их механической прочностью. Одним из вариантов может быть применение обработки в так называемом псевдоимпульсном режиме работы непрерывного СО<sub>2</sub>-лазера.

У монокристаллических образцов  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> размером  $\varnothing 5 \times 1$  мм исследовались ОСЛ-выходы с поверхностей, обработанных СО<sub>2</sub>-лазерным излучением со скоростью сканирования  $v=0,01$  м/с и мощностью  $P$  от 2 до 60 Вт. Первая партия образцов обрабатывалась при непрерывном воздействии излучения СО<sub>2</sub>-лазера, вторая – в псевдоимпульсном режиме. Для вышеуказанных режимов обработки в программе CorelLazer были созданы шаблоны. Для имитации псевдоимпульсного режима шаблон представлял собой набор прямоугольников, расположенных в шахматном порядке. Их длина вдоль линии сканирования  $d$  задавалась равной 26 или 52 мкм, а ширина определялась следом лазерного воздействия. Расстояние между прямоугольниками вдоль ( $\Delta X$ ) и поперек ( $\Delta Y$ ) линии сканирования варьировались в диапазоне от 85 до 156 мкм. При непрерывном сканировании расстояние между треками сканирования  $\Delta Y$  выбиралось равным 25, 50 и 76 мкм. Исследуемые образцы облучались бета-излучением (<sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y) тестовой дозой 8 мГр. ОСЛ-выходы измерялись с использованием системы КОРОС-333 [3].

Итоговые данные, включающие, в том числе, ранее полученные данные по импульсной обработке [2], представлены в табл. 1. Как видно, максимальные усредненные ОСЛ-выходы ( $S_{OSL}$ ) образцов, обработанных в непрерывном, «псевдоимпульсном» и импульсном режимах, достаточно близки, но достигаются они при существенно отличающихся геометрических и мощностных параметрах сканирования. Максимальное значение  $S_{OSL}$  при непрерывном режиме может быть получено при  $\Delta Y=50$  мкм и  $P=20-22$  Вт, при «псевдоимпульсном» –  $P=35-45$  Вт,  $\Delta X=156$  мкм и  $\Delta Y=150$  мкм,  $d=52$  мкм, а при импульсном –  $P=12$  Вт,  $\Delta X=75$  мкм и  $\Delta Y=75-100$  мкм. Немаловажным для практических приложений является разброс по ОСЛ-выходам ( $\Delta S_{OSL} / S_{OSL}$ ) в серии однотипных обработок, а также выход годного, учитывающий не только факт растрескивания, но и значения  $S_{OSL}$  ниже порога, равного 0,6. Из табл. 1 следует, что оптимальным сочетанием вышеуказанных параметров обладают образцы, обработанные в псевдоимпульсном режиме. У них разброс по ОСЛ-выходам и выходу годного составляют соответственно 13 и 85 %.

Таблица 1

**Характеристики исследуемых детекторов**

| Режим работы     | $S_{OSL}$ ,<br>о.е. | $(\Delta S_{OSL}/S_{OSL}) \times 100$ % | P, Вт | $\Delta X$ ,<br>мкм | $\Delta Y$ ,<br>мкм | Выход<br>годного, % |
|------------------|---------------------|---|-------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Псевдоимпульсный | 8400                | 13                                      | 35-45 | 156                 | 150                 | 85                  |
| Непрерывный      | 8000                | 20                                      | 20-22 | –                   | 50                  | 60                  |
| Импульсный [2]   | 8300                | 35                                      | 12    | 75                  | 75-<br>100          | 60                  |

*Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России для ИФМ УрО РАН.*

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Патент № 2747599 Российская Федерация. Способ получения тонкослойных детекторов ионизирующих излучений для кожной и глазной дозиметрии: № 2020128125: заявл. 21.08.2020; опубл. 11.05.2021/ Мильман И.И., Сюрдо А.И., Абашев Р.М.; заявитель ИФМ УрО РАН.
2. Сюрдо А.И., Волошин А.М., Абашев Р.М., Красноперов В.С., Мильман И.И., Моисейкин Е.В. Разработка люминесцентных кожных дозиметров для автоматической системы индивидуального дозиметрического контроля // Дефектоскопия. 2022. № 7. С. 70–77.
3. 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.

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО МАГНИТНОГО СТРУКТУРОСКОПА

© 2025 г. Никита Витальевич Гордеев<sup>1\*</sup>, А.Н. Сташков<sup>1\*\*</sup>, А.М. Матосян<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*

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

Контроль содержания остаточного аустенита (ОА) в нержавеющей сталях мартенситно-аустенитного класса необходим для обеспечения требуемых механических свойств. Детали из этих сталей сочетают высокую прочность, коррозионную стойкость и ударную вязкость, что делает их незаменимыми в аэрокосмической и энергетической отраслях. Для решения задачи контроля фазового состава применяются магнитные методы. В ИФМ УрО РАН были разработаны магнитные структуроскопы, позволяющие оперативно оценивать содержание остаточного аустенита в производственных условиях [1]. В конструкцию структуроскопов входят первичные преобразователи приставного типа с Н-образным ярмом (магнитопроводом). В качестве чувствительного элемента для измерения магнитного потока (индукции) применялись феррозонды, а в современных конструкциях – датчик Холла. Однако для его применения требуется наличие отверстия в ярме. Целью данной работы является оптимизация конструкции первичного преобразователя для повышения достоверности контроля количества ОА в ферромагнитных сталях.

Проведено численное моделирование с помощью метода конечных элементов работы первичного преобразователя с Н-образным ярмом. Проведен анализ распределения магнитной индукции в месте установки датчика Холла при варьировании размеров зазора в ярме. В качестве объектов контроля были выбраны образцы с максимальной разницей содержания ОА (9 %). Установлено, что максимальное значение магнитной индукции в центральной части перемычки ярма (место установки датчика Холла) достигается при отсутствии щели, при увеличении длины щели от 0 до 28 мм (при фиксированной ширине) магнитная индукция увеличивается (рис. 1а). Учитывая размеры датчика Холла (2×2×0,6 мм), оптимальной конфигурацией выреза в магнитопроводе является прямая щель шириной 0,8 мм, позволяющая увеличить в 2 раза чувствительность измерительной системы по сравнению с применением «фигурной» конфигурации щели, подобно той, что используется в магнитопроводе П-образного электромагнита [2].

Изготовлен макет первичного преобразователя с Н-образным ярмом, а также образцы из стали ВНС-5 с содержанием ОА от 9 до 18 %. Разное содержание ОА достигалось варьированием температуры закалки. С целью стабилизации ОА проводилась обработка холодом. Содержание ОА в образцах определяли по измеренной намагниченности насыщения с использованием

градуировочного графика. Испытания показали, что зависимость сигнала датчика Холла от ОА линейная, что удобно для практического применения.

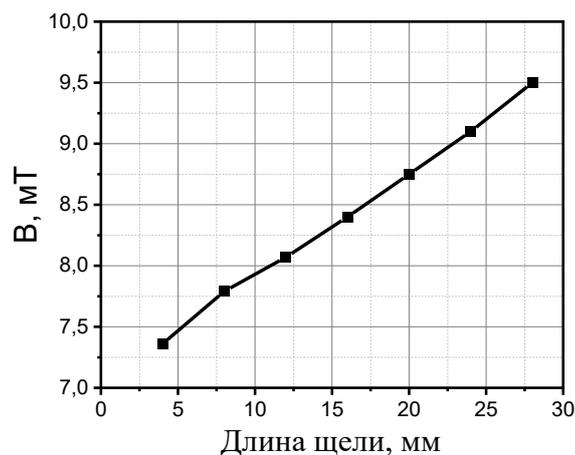


Рис. 1. Зависимости магнитной индукции в центральной части перемычки ярма первичного преобразователя дефектоскопа от длины щели

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ для ИФМ УрО РАН.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Буда Г.В.* Дифференциальный магнитный метод неразрушающего контроля и фазового анализа // Дефектоскопия. 2002. № 1. С. 26–43.
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.

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

© 2025 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. С. 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.

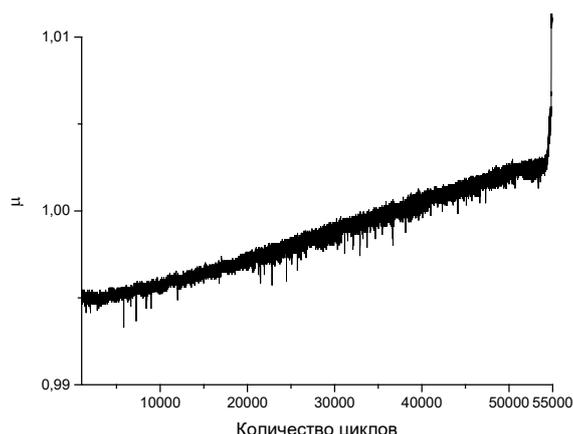


Рис. 1. Зависимость относительной магнитной проницаемости от количества циклов

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.

## ВЛИЯНИЕ МЕЛКИХ ЛОВУШЕК НА КИНЕТИКУ ОПТИЧЕСКИ СТИМУЛИРОВАННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ АНИОНОДЕФИЦИТНОГО КОРУНДА

© 2025 г. Александр Игоревич Бояринцев<sup>1\*</sup>

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

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

В настоящее время люминесцентно-активные материалы, такие как анионодефицитный корунд ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_{3-\delta}$ ), широко применяются в дозиметрии ионизирующих излучений. В некоторых образцах при импульсной стимуляции наблюдается эффект разгорания оптически стимулированной люминесценции (ОСЛ), существенно ухудшающий воспроизводимость результатов считывания дозиметрической информации при незначительном изменении температуры окружающей среды. В [1] была высказана гипотеза о связи эффекта разгорания с перезахватом носителей, освобождаемых при оптической стимуляции с основной ловушки, на мелкие, опустошающиеся при комнатных температурах и ниже. Однако природа таких ловушек не была точно установлена. Целью данного исследования являлось изучение влияния на кинетику ОСЛ анионодефицитного корунда мелких ловушек и установление их возможной природы.

Объектами исследования были специально подобранные образцы монокристаллов  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_{3-\delta}$  с отличающейся кинетикой разгорания. ОСЛ-кривые у них измерялись с помощью автоматизированной системы индивидуального дозиметрического контроля «КОРОС-333» [2]. Для исследования низкотемпературной термолюминесценции (ТЛ) была разработана экспериментальная установка, позволяющая охлаждать образцы до 230 К. Для выявления мелких ловушек и установления их роли в эффекте разгорания исследовалась ТЛ на специально сконструированном ТЛ-считывателе, в составе которого имелся элемент Пельтье и который позволял измерять кривые ТЛ в диапазоне 230-300 К [3].

На рис. 1а представлены кривые ОСЛ для трёх образцов с различной степенью разгорания. Кривые ОСЛ были разложены на два экспоненциальных компонента: быстрый ( $\tau_1$ ) и медленный ( $\tau_2$ ). Быстрый компонент разгорания у всех трёх кривых мало отличим и составляет ~36 мс. Медленный компонент изменяется в пределах от 200 до 500 мс. У указанных образцов дополнительно были измерены кривые ТЛ (рис. 1б). Сопоставляя данные рис. 1а и рис. 1б, можно заключить, что наиболее медленному разгоранию ОСЛ соответствует наибольший ТЛ-выход в низкотемпературном пике вблизи 270 К, который вызван опустошением, наиболее вероятно, одного типа мелких ловушек. Согласно [4] природа таких ловушек связана с Н-центром,

комплексным дефектом, состоящим из Н-иона вблизи F-центра (анионная вакансия с двумя электронами).

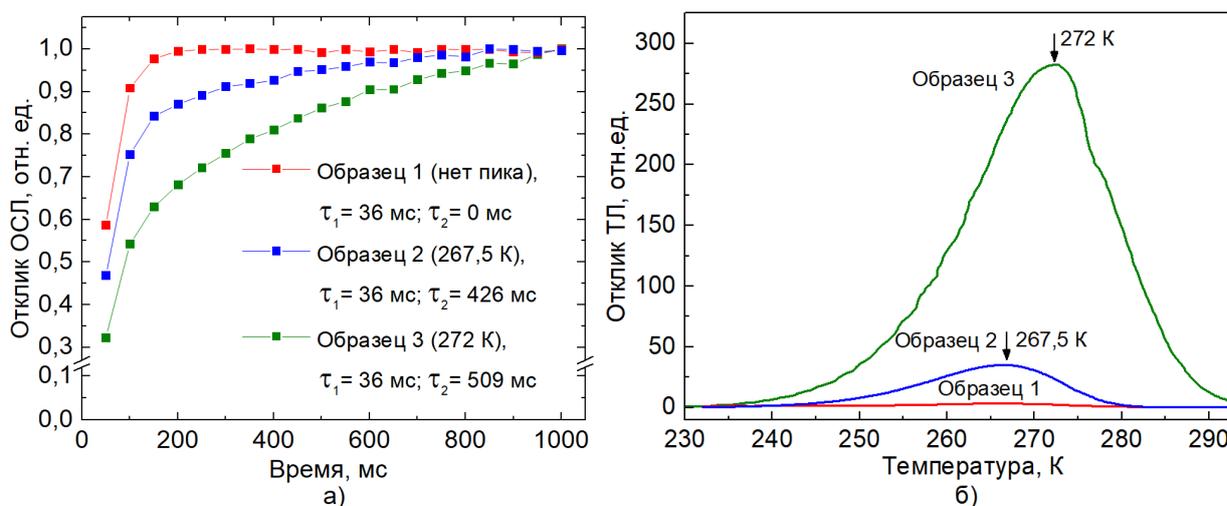


Рис. 1. Кривые ОСЛ (а) и низкотемпературной ТЛ со скоростью нагрева  $\beta = 0,5$  К/с (б) трёх образцов  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_{3-\delta}$  с отличающейся кинетикой разгорания

В работе также было исследовано влияние температуры облучения в диапазоне 230-300 К на интенсивность основного дозиметрического ТЛ-пика при 450 К и было показано, что увеличение концентрации вышеуказанного типа мелких ловушек может снижать ТЛ-отклик до 15 %. Поэтому и в ТЛ-дозиметрии, использующей детекторы из  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_{3-\delta}$ , при низких температурах облучения, возможно ухудшение метрологических характеристик. Для их улучшения необходимо проводить специальную отбраковку детекторов на наличие мелких ловушек, например, используя, как более экспрессный, ОСЛ-метод.

*Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России для ИФМ УрО РАН.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Akselrod M.S., Lucas A. C., Polf J. C., McKeever S. W. S. Optically stimulated luminescence of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  // *Radiation Measurements*. 1998. V. 29. P. 391–399.
2. Сурдо 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.
3. Boyarintsev A.I., Milman I.I., Abashev R.M., Surdo A.I. Thermoluminescence of anion-defective  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  crystals at low temperatures // *AIP Conference Proceedings*. 2020. V. 2313. Art. no. 030011.
4. Summers G.P. Thermoluminescence in single crystal  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  // *Radiation protection dosimetry*. 1984. V. 8. No. 1-2. P. 69–80.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИХРЕТОКОВОГО МЕТОДА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ТВЕРДОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННОГО ИЗДЕЛИЯ

© 2025 г. Александр Евгеньевич Конигин<sup>1,2</sup>, А.В. Бызов<sup>1</sup>, Д.Г. Ксенофонтов<sup>1</sup>,  
О.Н. Василенко<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> – Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
620075 Екатеринбург, ул. Мира, д. 19

\* - [konygin1983@inbox.ru](mailto:konygin1983@inbox.ru)

Для увеличения износостойкости стальных изделий в современных промышленных процессах применяются разнообразные методики, среди которых преобладает поверхностное упрочнение. Одним из популярных и используемых в промышленности методов является поверхностная закалка. В процессе такой обработки важно контролировать глубину упрочнения. В настоящее время для токопроводящих материалов применяется вихретоковый метод [1]. Он обладает повышенной чувствительностью к составу, микроструктуре и механическим свойствам объекта. С его помощью можно обнаружить изменения электромагнитных свойств материала, определить механические свойства материала. Значительным преимуществом вихретоковых датчиков является их устойчивость к загрязнениям (грязь, пыль, масло и т.д.), которые могут встречаться в производственных условиях, а также широкий диапазон температур функционирования. Ввиду актуальности применения вихретокового метода была изучена работа авторов, в которой они продемонстрировали методику по восстановлению профиля твердости поверхностно упрочнённых материалов с использованием сквозного вихретокового преобразователя [2]. Данная методика проверена экспериментально с применением накладного вихретокового преобразователя.

Для этого, в качестве поверхностно упрочненного слоя, были взяты образцы стали 45 различной толщины и твердости (табл. 1):

Таблица 1

Исследуемые образцы стали 45

| Толщина, мм (d) | Твердость (HRC) | Температура закалки, °С |
|-----------------|-----------------|-------------------------|
| 0,95            | 32,0            | 870                     |
| 2,00            | 62,5            | 870                     |
| 3,20            | 35,0            | 870                     |

Образец из магнитомягкой стали 3, взятый с условной твердостью HRC 20, выполнял роль сердцевины. Относительная магнитная проницаемость стали 45 принимается равной 75, удельная электрическая проводимость –  $3,5 \cdot 10^6$  См/м.

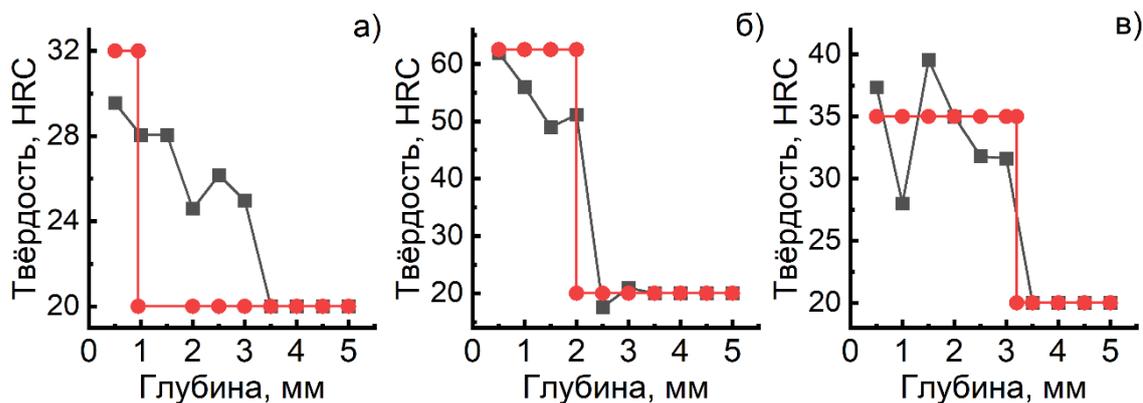


Рис. 1. Восстановленные профили твердости поверхностно упрочнённых образцов:

$d=0,95$  мм (а);  $d=2$  мм (б);  $d=3,2$  мм (в)

(● – реальный профиль; ■ – рассчитанный профиль)

Профиль твердости был получен на основе измерений, выполненных с помощью применения экспериментальной установки, состоящей из низкочастотного генератора, вихретокового преобразователя, осциллографа, вольтметра, измерителя разности фаз. Главным параметром контроля, необходимым для восстановления профиля твердости, стал модуль относительного вносимого напряжения трансформаторного преобразователя. Используя полученные данные, были рассчитаны соответствующие значения твердости для каждой толщины и построены профили твердости (рис. 1).

Исследование позволило восстановить профили твердости всех доступных образцов. Сравнение рассчитанных и реальных профилей твердости показало их схожее поведение, следовательно рассмотренная методика подходит для определения профиля твердости плоских изделий поверхностного упрочнения, а также может быть использована в процессе производства. Результаты эксперимента позволяют заключить, что представленная в литературе методика применима для восстановления профиля твердости изделий с поверхностным упрочнением с использованием накладного ВТП. Следует отметить необходимость дальнейшего развития и автоматизации этапов данной методики в целях повышения её качества и сокращения временных затрат.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Федосенко Ю.К., Шкатов П.Н., Ефимов А.Г., под общ.ред. В.В. Ключева Вихретоковый контроль: уч. пособие. М.: Спектр, 2011. 224 с.
2. Kahrobaee S. Kashefi M. Hardness profile plotting using multi-frequency multi-output electromagnetic sensor // NDT&E International. 2011. V 44. P. 335-338.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ИСПЫТАНИЯ НА ИЗГИБ

© 2025 г. **Константин Евгеньевич Мызнов<sup>1\*</sup>**, **Д.Г. Ксенофонтов<sup>1\*\*</sup>**, **С.В. Афанасьев<sup>1</sup>**,  
**О.Н. Василенко<sup>1\*\*\*</sup>**, **В.Н. Костин<sup>1\*\*\*\*</sup>**, **А.Н. Бондина<sup>2</sup>**, **А.С. Топорищев<sup>2</sup>**,  
**С.С. Кукушкин<sup>2</sup>**, **А.С. Саломатин<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», 620000 Екатеринбург, ул. К. Цеткин, д. 14*

\* - *myznov@imp.uran.ru*; \*\* - *ksenofontov@imp.uran.ru*;

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

Магистральные трубопроводы в процессе работы испытывают деформации, которые могут привести к разрушению трубы. Распространённым типом деформации является прогиб трубы в результате внешнего воздействия или под собственным весом [1, 2]. Оценка напряженно-деформированного состояния изогнутой трубы с помощью магнитного контроля представлена в работах [3, 4], но контроль осуществлялся по одной характеристике, что влечёт за собой недостатки, связанные с неоднозначностью определения напряжений [5, 6], поэтому актуальной задачей является разработка многопараметрового неразрушающего контроля трубопроводов.

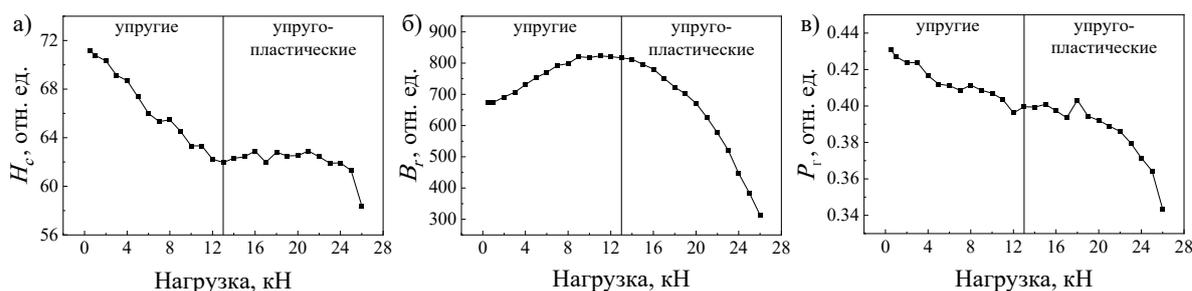


Рис. 1. Зависимости коэрцитивной силы (а), остаточной магнитной индукции (б) и площади петли гистерезиса (в) от приложенной изгибающей нагрузки

Для определения взаимосвязи между магнитными характеристиками, полученными с помощью аппаратно-программной системы DIUS-1.21M [7], и напряжённо-деформированным состоянием, возникающем при изгибе, было проведено испытание на статический трёхточечный изгиб образца из трубной стали 17Г1С. При разных приложенных к образцу изгибающих нагрузках при измерениях в середине образца были получены петли гистерезиса, по которым определялись следующие характеристики: коэрцитивная сила  $H_c$ , остаточная магнитная индукция  $B_r$  и площадь петли гистерезиса  $P_\gamma$ . Причём приложенные нагрузки превышали предел упругости. Полученные результаты показаны на рис. 1, по которым сделаны следующие выводы:

- при увеличении изгибающей нагрузки значения  $H_c$  в упругой области уменьшаются, а в упруго-пластической почти не меняются и только в самом конце испытания начинают падать;
- значения  $B_r$  в упругой области растут, а в упруго-пластической – падают;

- значения площади петли гистерезиса  $P_T$  имеют тенденцию к незначительному уменьшению при упругих и слабых упруго-пластических деформациях, а ближе к концу испытания начинают заметно падать;

- лучшая чувствительность к изгибающей деформации наблюдается у значений  $V_T$ .

В упругой области можно однозначно определять изгибающие напряжения по  $H_c$ . В упруго-пластической области при нагрузке выше 20 кН наиболее чувствительным и однозначным параметром является  $V_T$ , а при упруго-пластических напряжениях до 20 кН необходим многопараметровый контроль.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Александров Ю.В., Соловей В.О., Свирида М.М., Кузьбожев А.С. Напряженно-деформированное состояние газопровода, приводящее к аварийному разрушению // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2009. № 7. С. 42–45.
2. Игнатик А.А. Расчетно-экспериментальная оценка напряженного состояния трубопровода под воздействием изгибающей нагрузки и внутреннего давления // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2021. № 2(146). С. 114–126.
3. Садртдинов Р.А., Гейцан В.Б., Рыбалко В.Г., Новгородов Д.В. Исследование напряженного состояния стенки трубы с неоднородными остаточными напряжениями при изгибе // Дефектоскопия. 2012. № 1. С. 75–86.
4. Агиней Р.В., Леонов И.С. Исследование изменения коэрцитивной силы и параметров твердости стенок трубы при деформировании изгибом // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2012. № 3(31). С. 39–42.
5. Горкунов Э.С., Мушников А.Н. Магнитные методы оценки упругих напряжений в ферромагнитных сталях (обзор) // Контроль. Диагностика. 2020. Т. 23. № 12(270). С. 4–23.
6. Костин В.Н., Смородинский Я.Г. Многоцелевые аппаратно-программные системы активного электромагнитного контроля как тенденция // Дефектоскопия. 2017. № 7. С. 23–34.
7. Костин В.Н., Василенко О.Н., Бызов А.В. Мобильная аппаратно-программная система магнитной структуроскопии DIUS-1.15M // Дефектоскопия. 2018. № 9. С. 47–53.

## ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИОННОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ФАЗОВОГО СОСТАВА АУСТЕНИТНО-ФЕРРИТНЫХ НАПЛАВОК ИЗ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК

© 2025 г. Матвей Вячеславович Лапин<sup>1\*</sup>, А.Н. Мушников<sup>1\*\*</sup>, Н.Н. Соболева<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – ИМАШ УрО РАН, 620049 Екатеринбург, ул. Комсомольская, д. 34

\* - [Matt2003@inbox.ru](mailto:Matt2003@inbox.ru); \*\* - [Mushnikov@imach.uran.ru](mailto:Mushnikov@imach.uran.ru); \*\*\* - [Natashasoboleva@list.ru](mailto:Natashasoboleva@list.ru)

При сварке крупногабаритных конструкций сложной формы (корпуса судов, спецтехники и т.д.) не всегда есть возможность использовать подогрев или провести послесварочную термообработку. Решением этой проблемы может стать разработка порошковых проволок системы легирования Fe-Cr-Mn-Ni-Mo-Cu-N с содержанием азота от 0,25 до 0,40 мас. %, обеспечивающих формирование аустенитно-ферритной структуры, не нуждающейся в термообработке.

В работе были разработаны 12 составов порошковых проволок аустенитно-ферритного класса, одной из задач являлось определение доли феррита в наплавленном состоянии и оценка стабильности фазового состава наплавленного металла при пластическом деформировании.

Объектом исследования были образцы многослойных наплавов, изготовленные из разработанных проволок, которые подвергали статическому растяжению от 0 % до разрыва образца на машине Tinius Olsen Super L-60. Гистерезисные магнитные параметры были определены с применением магнитоизмерительного комплекса Remagraph C-500. Для определения качественного и количественного фазового состава были построены графики зависимости дифференциальной восприимчивости от напряженности магнитного поля и обработаны по методикам [1, 2].

Анализ графиков подтвердил наличие лишь одной ферромагнитной фазы – феррита, независимо от степени деформации образцов.

*Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-20059 (<https://rscf.ru/project/24-19-20059/>) и Правительства Свердловской области.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Корх М.К., Ригмант М.Б., Давыдов Д.И., Шишкин Д.А., Ничипурук А.П., Корх Ю.В. Определение фазового состава трехфазных хромоникелевых сталей по магнитным свойствам // Дефектоскопия. 2015. № 12. С. 20–31.
2. Ригмант М.Б., Ничипурук А.П., Корх М.К. Возможность раздельного измерения количества феррита и мартенсита деформации в трехфазных сталях аустенитного класса магнитным методом // Дефектоскопия. 2012. № 9. С. 10–23.

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНИКИ СПЕКЛОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ УСТАЛОСТНОЙ ДЕГРАДАЦИИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16

© 2025 г. Константин Вячеславович Наумов<sup>1,2\*</sup>, А.П. Владимиров<sup>1\*\*</sup>,  
И.С. Каманцев<sup>1\*\*\*</sup>, Н.А. Друкаренко<sup>1\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – ИМАШ УрО РАН, 620049 Екатеринбург, ул. Комсомольская, д. 34

<sup>2</sup> – УрФУ, 620002 Екатеринбург, ул. Мира, д. 19

\* - [knaumov98@mail.ru](mailto:knaumov98@mail.ru); \*\* - [vap52@bk.ru](mailto:vap52@bk.ru); \*\*\* - [trophyland@mail.ru](mailto:trophyland@mail.ru); \*\*\*\* - [targosk@ya.ru](mailto:targosk@ya.ru)

Спекловые методы уже применялись для изучения процессов усталостного разрушения в стали и оргстекле. Установлено, что с самого начала испытаний на усталость имеет место локализация необратимых процессов в малых зонах, а в стали усталостная трещина зарождается на участке размером порядка 10 мкм при относительной макроскопической деформации порядка  $10^{-1}$ , что схоже с процессами при квазистатических нагрузках. Но было неизвестно, происходят ли схожие процессы при многоциклового усталости в других материалах. Поэтому объектом исследования были выбраны образцы из алюминиевого сплава Д16, а целью – выяснить, схожи ли процессы в алюминиевых сплавах с теми, что происходят в других материалах.

Образцы подвергались различной нагрузке (равной пределу текучести, а также на 20 процентов большей и на 20 процентов меньшей) на высокочастотной резонансной испытательной машине, шероховатая сторона освещалась красным лазером. Спекловые изображения с трёх разных ракурсов регистрировались каждые 0,5 секунды, далее обрабатывались специальным программным обеспечением для получения на отдельных участках значений средней интенсивности  $\tilde{I}$  и временной автокорреляционной функции  $\eta(t)$ . В дальнейшем находили компоненты вектора относительного перемещения  $\Delta U$  точек поверхности в сопряжённых точках образца.

Уже в самом начале испытаний локализовывались необратимые деформации, а в дальнейшем (в точках, где зарождались трещины, при амплитудах цикла, не меньших предела текучести) значения  $\eta(t)$  изменялись квазипериодически с изменением знака или сразу, или после некоторого количества циклов, подобно тому, как это происходило в образцах из других материалов, в частности стали.

Компоненты вектора относительного перемещения изменялись схожим образом с тем, как это происходило в стали (см. рис. 1), количественно и качественно, а предельный порядок растягивающих деформаций  $\Delta u_y/\Delta u$  на базе  $\Delta u=60$  мкм составил около  $10^{-1}$ . Также было обнаружено, что деградация сплава Д16, как и в оргстекле и в стали, в начальной стадии происходит путем циклической ползучести и разрывов межатомных связей. На заключительной стадии имеет место деформационное разупрочнение материала малого участка.

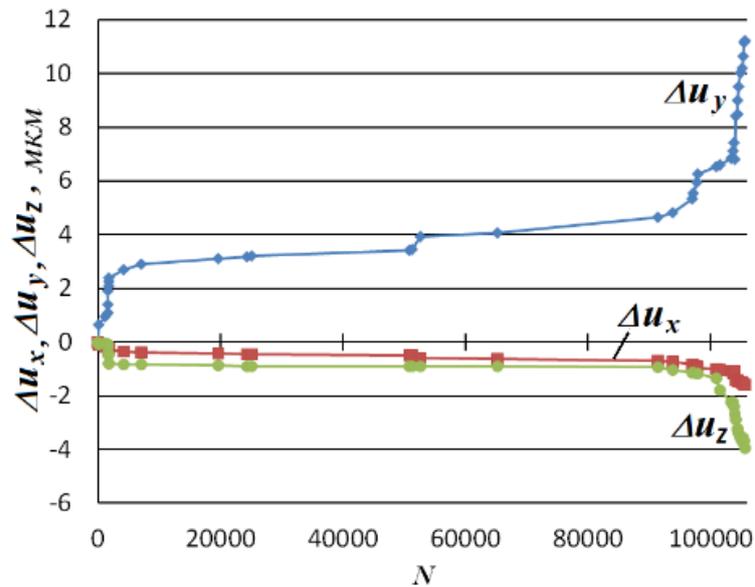


Рис. 1. Изменение компонент вектора относительного перемещения  $\Delta U$  от числа циклов  $N$

На основании анализа данных можно заключить, что и усталостные процессы в разных материалах схожи по своей природе.

Авторы благодарят Кузнецова А.В. за помощь в проведении экспериментов. Эксперименты проводились на оборудовании центра коллективного пользования "Пластометрия" ИМАШ УрО РАН в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации для ИМАШ УрО РАН. Работа была частично поддержана Программой развития Уральского федерального университета в рамках программы «Приоритет-2030».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Vladimirov A.P. Speckle metrology of dynamic macro- and micro-processes in deformable media // Optical Engineering. 2016. V. 55. No. 12. Art. no. 121727.
2. Vladimirov A.P. Dynamic Speckle Interferometry of High-Cycle Material Fatigue: Theory and Some Experiments // AIP Conference Proceedings. 2016. V. 1740. Art. no. 040004.
3. Владимиров А.П., Каманцев И.С., Друкаренко Н.А., Тришин В.Н., Акашев Л.А., Дружинин А.В. Оценка усталостных повреждений в органическом стекле оптическими методами // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 127. Вып. 5. С. 870–880.
4. Vladimirov A.P., Drukarenko N.A., Myznov K.E. Using speckle images for determining the local plastic strains arising at high-cycle fatigue of 09G2S steel // Technical Physics Letters. 2021. V. 47. No. 8. P. 773–776.
5. Владимиров А.П., Каманцев И.С., Друкаренко Н.А., Мызнов К.Е., Наумов К.В. Сравнение результатов применения двух спекловых методов изучения многоциклового усталости конструкционной стали. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24. № 1. С. 20–29.

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

© 2025 г. Артём Антонович Попков\*, И.И. Снежков<sup>1</sup>, М.А. Гуляев<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> – ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»,  
630049 Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 191  
\* - zabagy@gmail.com

В конструкциях машин, механизмов и строительных сооружениях широко применяются болтовые и прессовые соединения, неподвижность которых обеспечивается силами трения. Необходимый уровень этих сил создается упругими механическими напряжениями, формируемыми на этапе монтажа. В процессе эксплуатации при воздействии ударных и вибрационных нагрузок, износов, развития трещин под напряжением, коррозии и повышенного нагрева упругие механические напряжения снижаются. Это приводит к пропорциональному уменьшению сил трения. Когда эти силы становятся ниже рабочих нагрузок, нарушается неподвижность соединения, что является причиной отказов технических средств в эксплуатации. Контроль прочности соединений может быть выполнен в процессе монтажа по силе затяжки или запрессовки. Однако многократные операции демонтажа болтовых соединений и соединений с натягом повреждают поверхности деталей и негативно сказываются на их сроке службы [1]. Таким образом разработка методических и технических средств определения прочности болтовых и прессовых соединений без снятия является актуальной.

Целью работы является оценка прочности болтовых и прессовых соединений по результатам частотного анализа свободных и вынужденных колебаний. В ходе экспериментальных исследований объект контроля подвергался воздействию ультразвуковых колебаний определенной частоты и конфигурации, источником которых являлся пьезоэлектрический преобразователь, устанавливаемый на поверхность объекта. По характеристикам отраженных колебаний на резонансных частотах оценивалась величина трения, возникающего между поверхностями сопряжения [2].

С использованием технологии фотополимерной 3D печати была изготовлена оснастка для закрепления ультразвуковых преобразователей на болтовом соединении. Особенностью исследования стала схема возбуждения колебаний, которая предполагала одновременное воздействие ультразвуковыми колебаниями на все грани гайки болтового соединения, а также одновременную регистрацию отраженных колебаний. Для этого использовались шесть пьезоэлектрических ультразвуковых преобразователей, последовательно подключенных к источнику возбуждения и регистрации. Количество преобразователей совпадает с количеством граней на гайке болтового соединения, используемого в мостовых конструкциях. Применение подобного подхода позволило уменьшить влияние неравномерности толщины слоя контактной

жидкости, неплотности прижатия поверхности преобразователя к грани и других мешающих факторов за счет усреднения, а также ускорить процесс контроля одного болтового соединения. В результате проведенных экспериментов установлено, что зависимость амплитуд отраженных колебаний на резонансных частотах от силы затяжки болтового соединения удовлетворительно описывается линейной функцией с коэффициентом детерминации более 0,9.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Матлин М.М., Казанкин В.А., Казанкина Е.Н.* Методы повышения эффективности контроля затяжки резьбовых соединений // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2020. № 7. С. 40–42.
2. *Бехер С.А., Степанова Л.Н., Рыжова А.О., Бобров А.Л.* Контроль натяга колец подшипников поверхностными волнами с использованием эффекта акустоупругости // Дефектоскопия. 2021. № 4. С. 13–21.

# АНАЛИЗ ДИСПЕРСИИ ВОЛН ЛЭМБА ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ МАТЕРИАЛА ОБОЛОЧЕК ТВЭЛ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

© 2025 г. Алексей Витальевич Васильев<sup>1\*</sup>, Д.В. Перов<sup>2</sup>, Д.Ю. Бирюков<sup>1</sup>,  
В.Н. Костин<sup>2</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

<sup>2</sup> – Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, 620108 Екатеринбург,  
ул. С. Ковалевской, д. 18

\* - [vasilev.a.v98@list.ru](mailto:vasilev.a.v98@list.ru)

В последние десятилетия особое внимание уделяется исследованию влияния радиационного воздействия на материалы, используемые в ядерной энергетике, особенно в контексте их применения в топливных элементах (ТВЭЛ) реакторов [1]. Радиационные повреждения, вызванные потоками высокоэнергетических частиц, таких как электроны с энергией порядка 10 МэВ, могут влиять на механические и акустические характеристики используемых материалов. Многократное смещение атомов под действием облучения приводит к вакансионному распуханию, потере пластичности и прочности материалов ТВЭЛ [2]. Поэтому в атомной промышленности поставлена задача увеличения срока их службы с целью снижения затрат на производство электроэнергии.

Волны Лэмба позволяют выявлять изменения в структуре и механических свойствах тонкостенных объектов типа пластин или труб, которые являются акустическими волноводами, поскольку их толщина сравнима с длиной акустической волны [3].

В настоящей работе исследовались исходный и облученный образцы в виде пластин, изготовленные из развернутой цилиндрической оболочки ТВЭЛ.

Измерение ультразвуковых импульсов волн Лэмба выполнено одним совмещенным пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭП) при отражении сигналов от торцов исследуемых образцов. Параметры преобразователя: угол ввода  $\alpha = 40^\circ$ , рабочая частота  $f = 5$  МГц. Общее расстояние, пройденное волной в образце  $h = 60$  мм. Ультразвуковые импульсы волн Лэмба были зарегистрированы в образцах на дефектоскопе PCUS-10.

С использованием алгоритма оценки мгновенной частоты акустических сигналов, основанного на использовании специализированного непрерывного вейвлетного преобразования [4], была выполнена обработка импульсов волн Лэмба. Это позволило восстановить протяженные участки дисперсионной характеристики моды волн Лэмба типа  $s_0$  (рис. 1).

Дисперсионная характеристика моды  $s_0$  в облученном образце заметно смещена вправо по оси частот относительно исходного. Данное смещение может быть связано как с изменением

модуля упругости материала вследствие радиационных повреждений, так и с появлением внутренних напряжений, вызванных структурными изменениями под воздействием излучения.

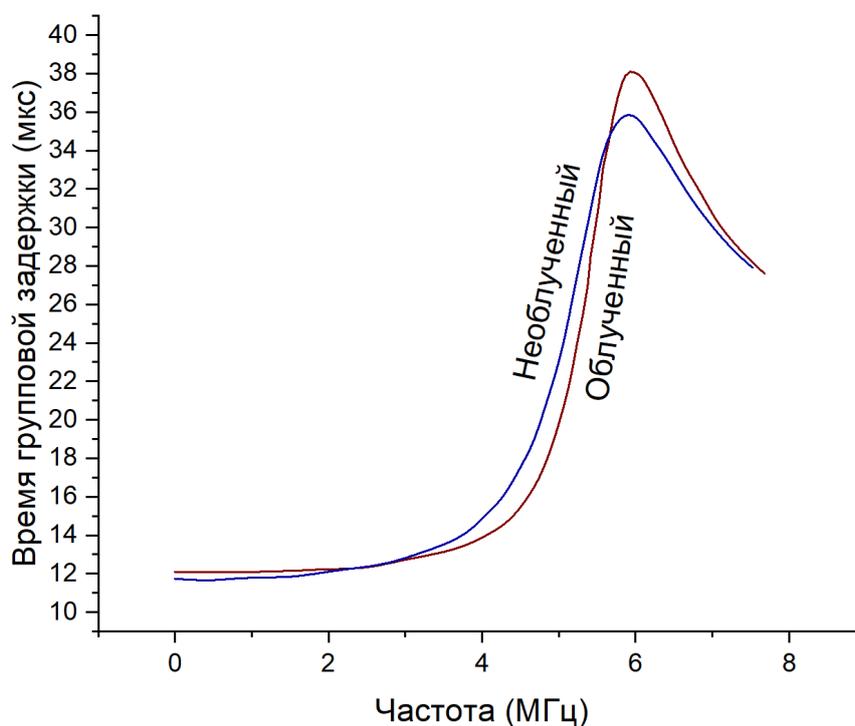


Рис. 1. Дисперсионные зависимости мод  $s_0$  волн Лэмба в исходном и облученном образцах

Результаты измерений и расчетов показали, что для получения объективной информации с использованием волн Лэмба уточнение и анализ дисперсионных зависимостей представляет собой важный и ответственный этап организации прецизионного контроля радиационных повреждений объектов типа оболочек ТВЭЛ.

*Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки России для УрФУ (проект FEUZ-2023-0014) и госзадания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Горбунов В.А., Андрианов С.Г., Коновальцева С.С. Оценка влияния радиационного теплообмена на параметры температурных полей твэлов различного конструктивного исполнения // Вестник ИГЭУ. 2021. № 2. С. 23–31.
2. Сухих А.В. Содержание кобальта и вакансионное распухание стали ЧС-68 // Атомная энергия. 2007. Т. 102. Вып. 3. С. 163–168.
- 3 Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М., Наука, 1966.
4. Перов Д.В., Ринкевич А.Б. Локализация отражателей в пластинах при ультразвуковом контроле волнами Лэмба // Дефектоскопия. 2017. № 4. С. 27–41.

# ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДА ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

© 2025 г. Артём Максимович Горнов<sup>1\*</sup>, А.М. Шмаков<sup>1\*\*</sup>, А.В. Федоров<sup>1\*\*\*</sup>

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

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

Обеспечение требуемых эксплуатационных характеристик и надежности авиационных конструкций, в которых находят широкое применение многослойные полимерные композиционные покрытия (ПКП), требует разработки и внедрения методов неразрушающего контроля (НК), позволяющих проводить комплексную оценку качества этих покрытий. К наиболее критичным дефектам относятся нарушения сплошности типа расслоений, нарушения адгезионного взаимодействия между покрытием и подложкой и между отдельными слоями многослойного ПКП, а также отклонения толщины покрытия и его слоев от номинальных значений. Традиционные разрушающие методы контроля, основанные на механических испытаниях образцов-свидетелей, не позволяют проводить контроль изделий в процессе эксплуатации. В связи с этим, разработка и внедрение методов НК, обеспечивающих комплексную оценку качества ПКП на всех этапах жизненного цикла изделия, представляет собой актуальную научно-техническую задачу. Целью настоящей работы является обоснование возможности применения и демонстрация практической эффективности метода оптико-акустического эхо-импульсного зондирования для решения комплекса задач НК многослойных ПКП авиационного назначения.

В работе исследован ультразвуковой эхо-метод с оптико-акустической генерацией упругих колебаний. В основе метода лежит явление термо-акустического эффекта, заключающееся в генерации акустических волн в материале при поглощении им модулированного по интенсивности лазерного излучения. В качестве источника зондирующих импульсов используется оптико-акустический преобразователь (ОАП). Принцип действия ОАП основан на поглощении наносекундного импульса лазерного излучения в тонком слое оптически поглощающего материала, что приводит к его нестационарному термоупругому расширению и генерации короткого широкополосного акустического импульса. Этот импульс распространяется вглубь исследуемого объекта и испытывает отражение и преломление на границах раздела сред с различным акустическим импедансом. Регистрация отраженных эхо-сигналов осуществляется широкополосным пьезоэлектрическим приемником, интегрированным в конструкцию ОАП. Анализ временной развертки зарегистрированных сигналов и амплитудных параметров отдельных эхо-импульсов позволяет получить информацию о структуре ПКП, наличии дефектов, их пространственной локализации, а также оценить адгезионную прочность.

Для экспериментальной верификации возможностей метода разработана серия образцов многослойных ПКП, нанесенных на подложки из металлических материалов. Структура многослойного ПКП формировалась методом послойного нанесения полимерного связующего с последующей полимеризацией каждого слоя. Данная технология обеспечивает возможность контролируемого формирования многослойной структуры с заданным количеством слоев и моделирования дефектов типа "расслоение" на границах раздела слоев путем локального нарушения технологического процесса.

В результате анализа зарегистрированных эхо-сигналов были решены следующие задачи:

Детектирование дефектов типа "расслоение". Наличие дефектов данного типа приводит к появлению на А-сканах эхо-импульсов, обусловленных отражением акустической волны от границы дефекта. Амплитуда эхо-импульса от дефекта определяется коэффициентом отражения на границе раздела "материал ПКП – дефект", который зависит от соотношения акустических импедансов контактирующих сред. Анализ амплитудно-временных параметров эхо-импульсов позволяет не только детектировать дефекты, но и определять их глубину залегания.

Измерение толщины. Определение общей толщины ПКП и его отдельных слоев осуществлялось путем измерения временных интервалов между эхо-импульсами, отраженными от соответствующих границ раздела. Высокое временное разрешение метода оптико-акустического зондирования, обусловленное малой длительностью зондирующего акустического импульса, обеспечивает высокую точность определения толщины.

Оценка адгезии. Для количественной оценки адгезионной прочности соединений в ПКП предложен критерий, основанный на анализе амплитудных и временных параметров эхо-импульсов. Разработанный критерий, учитывающий данные изменения параметров, позволяет проводить количественную оценку адгезионной прочности неразрушающим методом. Установленная корреляция между параметрами ультразвукового контроля и результатами механических испытаний образцов на отрыв подтверждает применимость предлагаемого подхода к оценке адгезии.

Результаты проведенных экспериментальных исследований подтверждают, что метод ультразвукового эхо-импульсного зондирования с оптико-акустической генерацией упругих колебаний обладает высоким потенциалом для применения в качестве средства комплексного неразрушающего контроля качества многослойных полимерных композиционных покрытий, используемых в авиастроении.

## РАЗДЕЛЬНО-СОВМЕЩЕННЫЙ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДНОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ТЕЛА ТРУБЫ

© 2025 г. Сергей Сергеевич Ступин<sup>1\*</sup>, П.В. Соломенчук<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup> – ООО «КОНСТАНТА», 198097 Санкт-Петербург, Огородный переулок, д.21

\* - [dat.si.m17@gmail.com](mailto:dat.si.m17@gmail.com); \*\* - [pavel257@mail.ru](mailto:pavel257@mail.ru)

Для проведения процедуры неразрушающего контроля тела трубы зарекомендовал себя акустический волноводный метод с применением магнитострикционных преобразователей. Он позволяет проводить контроль состояния тела трубы на большом расстоянии от места установки преобразователей на трубу.

Конструкция существующих преобразователей позволяет проводить контроль с применением фазированных акустических волн разной длины, рис. 1а. Изменение длины волны осуществляется путем механической замены коммутатора витков, формирующих волну заданной длины, рис. 1б. Такой подход не приемлем в случае проведения мониторинга, при котором изменение длины волны должно осуществляться автоматически.

Автоматический коммутатор для существующего типа преобразователя практически не реализуем ввиду необходимости использования чрезмерного количества элементов, переключающих секции катушки возбуждения преобразователя. Конструкция существующих преобразователей подразумевает использование всей длины магнитострикционной ленты для генерации акустических волн. Достигается это тем, что в таком преобразователе на прием и возбуждение волны работают сразу все витки, что обуславливает увеличение числа возбуждаемых волн и, соответственно, секций катушки возбуждения при уменьшении их длины.

Решением этих проблем является сохранение постоянного количества возбуждаемых волн и, соответственно, секций катушек возбуждения с изменением их длин, рис. 2б. Недостатком такого решения является снижение амплитуды сигнала с уменьшением длины волны, обусловленное уменьшением числа витков, что нивелируется разделением функции возбуждения и приема с использованием дополнительной приемной многовитковой катушки, рис. 2а.

Применение описанного раздельно-совмещенного преобразователя открывает возможности для приема акустической волн более широкого спектра длин. Использование двух одинаковых приемных катушек, расположенных симметрично относительно магнитострикционной ленты, позволяет принимать одни и те же акустические волны, но сдвинутые друг относительно друга по времени, за счёт чего могут быть реализованы алгоритмы синхронной фильтрации сигнала.

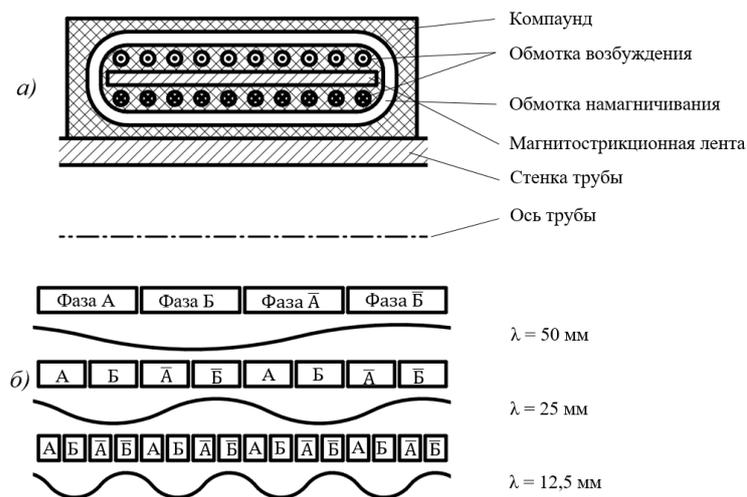


Рис. 1. Схематичное изображение конструкции (а) и формирование акустической волны (б) в существующих преобразователях

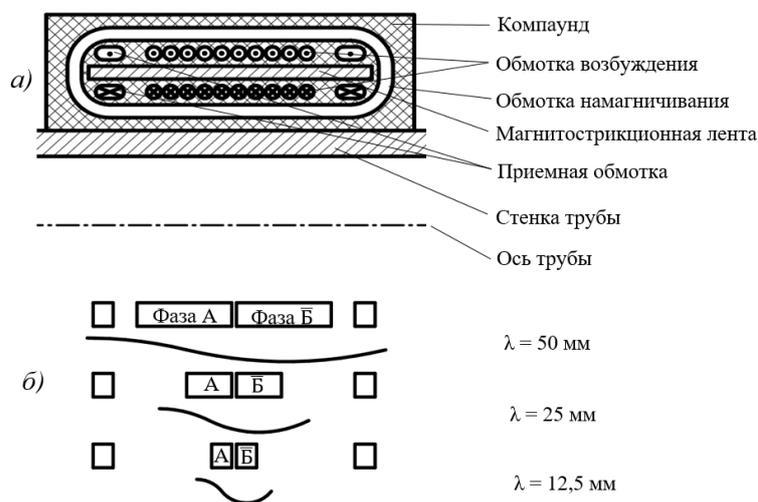


Рис. 2. Схематичное изображение конструкции (а) и формирование акустической волны (б) в раздельно-совмещенном преобразователе

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Vinogradov S., Cobb A., Light G. Review of magnetostrictive transducers (MsT) utilizing reversed Wiedemann effect // AIP Conference Proceedings. 2017. V. 1806. Art. no. 020008.
2. Kim Y.G. et al. Generating and detecting torsional guided waves using magnetostrictive sensors of crossed coils // NDT & E International. 2011. V. 44. № 2. P. 145–151.

# ПРЯМОЙ СОВМЕЩЕННЫЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ДО +450°C ДЛЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ

© 2025 г. Вячеслав Игоревич Мальцев<sup>1\*</sup>

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

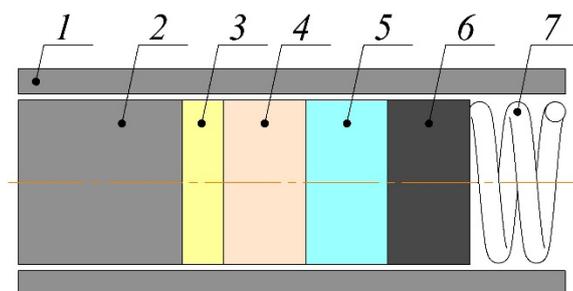
\* - [mvi@constanta-us.com](mailto:mvi@constanta-us.com)

В докладе рассмотрены вопросы проектирования прямого совмещенного пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) для систем мониторинга состояния стационарных инфраструктурных объектов и технологического оборудования в диапазоне температур от -70 °С до +450 °С (измерение остаточной толщины и скорости коррозии/эрозии стенок технологического оборудования).

Для увеличения возможных областей применения рассматриваемого ПЭП (количества объектов и критических точек, пригодных для размещения) конструкция преобразователя не предусматривает вынос пьезоэлемента из зоны термического влияния, что традиционно требует использования специальных материалов и удлинения линии задержки. В качестве материала линии задержки используется нержавеющей сталь, обеспечивающая предпочтительную пару по согласованию акустических импедансов линии задержки и материала объекта контроля (в большинстве случаев технологическое оборудование, работающее при температурах до +450 °С, изготавливается из нержавеющей сталей), а также возможность длительной эксплуатации без технического обслуживания.

Для создания надежного долговечного и термостабильного акустического контакта ПЭП с поверхностью объекта контроля (ОК) во всем рассматриваемом диапазоне температур применяется сухой контакт, обеспечиваемый подготовкой поверхности ОК (до необходимой шероховатости) и прижимом с требуемым усилием специальными оснастками (например, силовыми хомутами). Сухой контакт между пьезоэлементом и линией задержки осуществляется через слои металлизации из драгоценных пластических металлов, формируемых на поверхности пьезоэлемента, толщина которых на порядок меньше длины волны, что обеспечивает акустическую прозрачность границы, сравнимую по коэффициенту прозрачности  $D_{tt}$  с контактом через специализированные контактные пасты и значительно превышающую их по температурному диапазону применения (рис. 1).

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволили подобрать синтетический монокристалл с температурой Кюри 1145–1210 °С [1], способный излучать и принимать сдвиговые волны, обладающий необходимыми термостабильными пьезоэлектрическими и механическими характеристиками для использования в качестве пьезоэлемента ПЭП. Применение сдвиговых волн позволяет увеличить разрешающую способность при измерениях.



1 – корпус, 2 – линия задержки, 3 – слой металлизации пьезоэлемента, 4 – пьезоэлемент,  
5 – демпфер, 6 – изолятор, 7 – пружина

Рис. 1. Структура высокотемпературного ПЭП

Конструкция преобразователя, структура которого представлена на рис. 1, включает демпфирующий блок, в состав которого входит термостабилизированный демпфер из прессованной алюминиевой фольги, позволяющий добиться необходимых значений лучевой разрешающей способности и изолятор из алюминиевого сплава с диэлектрическим покрытием. Пружина обеспечивает необходимое усилие прижима пьезоэлемента к линии задержки и демпферу во всем диапазоне температур от  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+450\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Встроенная в конструкцию ПЭП термопара дает возможность учитывать градиент температур в преобразователе и изменение скорости распространения сдвиговых волн в линии задержки при измерениях, что позволяет обеспечивать требуемые погрешности при расчетах.

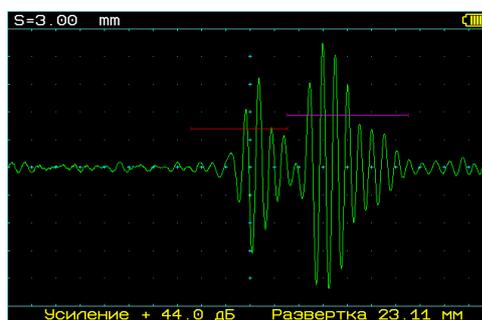


Рис. 2. Форма сигналов. Границы раздела сред (красный строб), донный от дальней стенки ОК толщиной 3 мм (фиолетовый строб) при температуре пьезоэлемента  $+350\text{ }^{\circ}\text{C}$

В докладе подробно изложены принципы конструирования, полученные экспериментальные результаты и вопросы применения высокотемпературного ПЭП в системах мониторинга состояния и технического диагностирования распределенных инфраструктурных объектов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kazys R., Vaskeliene V. High Temperature Ultrasonic Transducers: A Review // Sensors. 2021. V. 21. 3200.

## СИНТЕЗ ЗОНДИРУЮЩЕГО ПОЛЯ В ПРИБОРАХ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ

© 2025 г. Родион Александрович Дикий<sup>1\*</sup>, В.В. Мирошников<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup> – ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В. Даля», 291034 Луганская Народная Республика, городской округ город Луганск, Луганск, квартал Молодежный, д. 20А

\* - [rodiondq@yandex.ru](mailto:rodiondq@yandex.ru); \*\* - [prorectormvv@mail.ru](mailto:prorectormvv@mail.ru)

Эффективность магнитного контроля во многом определяется параметрами и конструкцией катушки намагничивания. Наиболее эффективными являются катушки, создающие однородное магнитное поле в заданном объеме за пределами магнитной системы, которая не содержит магнитопровод. Поэтому важным вопросом проектирования приборов магнитного контроля является задача синтеза зондирующего магнитного поля.

Синтез поля проводим для прямоугольной катушки, разбивая ее на отдельные секции и изменяя токи в секциях [1]. Проводя синтез магнитного поля, удастся оптимизировать параметры зондирующей катушки. Предлагается два способа оптимизации катушки намагничивания, создающей зондирующее поле у торца катушки, имеющего форму параллелепипеда.

Пусть система намагничивания состоит из трех тонких прямоугольных секций, которые лежат в плоскостях, параллельных плоскости  $xOz$ . Искомыми будут размеры тонких катушек, значение  $y$ -координаты второй катушки и значения токов в них.

Алгоритм решения задачи синтеза следующий. Синтез магнитного поля зондирующей катушки происходит путем подбора оптимальных размеров секций катушки, которые обеспечивают минимальные значения токов в данных секциях при заданных значениях напряженности в контролируемой зоне.

Вначале найдем токи бесконечно тонких прямоугольных витков, размеры которых равны  $2a_j$  (ширина) и  $2c_j$  (длина) ( $j = 1, 2, 3$ ), а  $y$ -координаты этих витков соответствуют серединам (вдоль  $y$ ) проектируемых тонких катушек.

Определим зависимость  $y$ -составляющей напряженности магнитного поля  $k$ -ой точке в пространстве от величины тока в одной  $j$ -ой секции, которая имеет вид:

$$H_j(y) = \frac{1}{\pi} \frac{a_j c_j}{\sqrt{a_j^2 + (y_k - y_j)^2 + c_j^2}} \left[ \frac{1}{(y_k - y_j)^2 + a_j^2} + \frac{1}{(y_k - y_j)^2 + c_j^2} \right]. \quad (1)$$

Токи в секциях катушки находятся из условия

$$\left\| \mathbf{H}(y) - \sum_{j=1}^N i_j \mathbf{H}_j(y) \right\| = \min. \quad (2)$$

Здесь норма понимается в смысле нормы в линейном Гильбертовом пространстве векторных полей, заданных в интервале  $y \in [-1; 1]$ . Итак, мы приходим к задаче о разложении по

неортогональной системе [2]. Эта задача в данном случае сводится к системе линейных алгебраических уравнений.

$$\sum_{j=1}^N (H, H_k) i_j = (H, H_k), k = \overline{1, N}. \quad (3)$$

Решением системы уравнений будет совокупность токов в секциях катушек.

В данном случае при первом способе оптимизации расчет проводился для секции катушек, у которых был задан геометрический  $a_j$ , а  $c_j$  параметр подбирался таким образом, чтобы токи  $i_1$ ,  $i_2$  и  $i_3$  были минимальными. Было принято, что катушка состоит из одного витка.

Синтез проводился для значения напряженности равной  $H = 200$  А/м, значения напряженности определялись в центре системы намагничивания на расстоянии  $y_1 = 0$  м,  $y_2 = 0,05$  м,  $y_3 = 0,15$  м.

Для второго способа оптимизации размеры секций брались с учетом первого метода. При расчетах был использован метод прямого перебора.

Результаты вычислений токов секций катушек приведены на рис. 1.

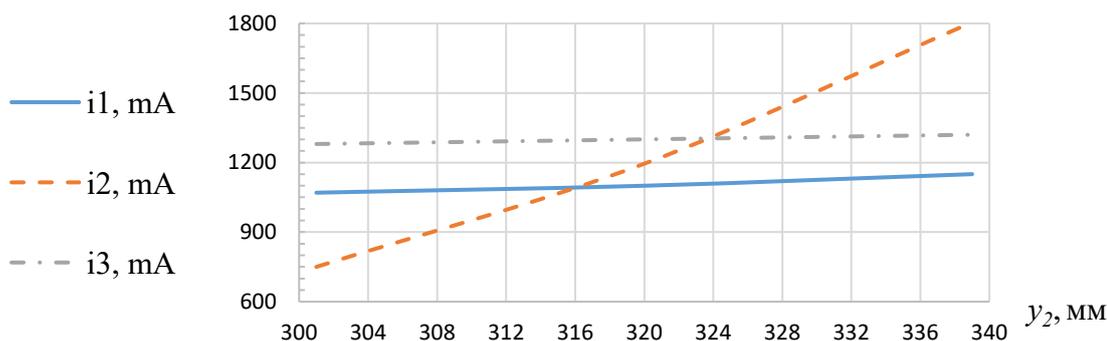


Рис. 1. Изменение значений требуемого тока в секциях катушки с изменением положения второй секции по  $y$ -координате

Для получения однородного поля в контролируемой зоне предлагается применять блоки возбуждающих катушек, синтез размеров которых проводить по описанному выше методу для получения заданных значений напряженности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Garret M.W. Axially symmetric system for generating measuring magnetic fields. Pt. 1 // Applied Physics. 1951. V. 22. No. 9. P. 91–99.
2. Стадник И.П. Улучшение сходимости итерационного процесса разложения по неортогональной системе в применении к синтезу катушки прямоугольного сечения по заданному магнитному полю в объеме // Изв. вузов. Электромеханика. 1984. № 7. С. 5–11.

# КОНТРОЛЬ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

© 2025 г. Екатерина Сергеевна Старосельская<sup>1\*</sup>, Е.К. Щипцова<sup>1\*\*</sup>, Э.А. Кремчев<sup>2\*\*\*</sup>,  
Д.С. Громыка<sup>1\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,  
199106 Санкт-Петербург, 21 линия В.О., д. 2

<sup>2</sup> – НИУ ВШЭ, 190121 Санкт-Петербург, ул. Союза Печатников, д. 16

\* - s220385@stud.spmi.ru; \*\* - Schiptsova\_EK@pers.spmi.ru;

\*\*\* - kremcheev@mail.ru; \*\*\*\* - gromyka\_ds@pers.spmi.ru

В настоящее время для решения задач неразрушающего контроля (НК) механических свойств материалов широкое применение находят портативные приборы контроля. Один из перспективных методов контроля — динамическое инструментальное индентирование (ДИИ), которое позволяет контролировать не только пластичные, но и упругие свойства материала [1-3].

В качестве объекта контроля были выбраны разные полиэтиленовые трубы, изготовленные из разного вида полиэтилена, а также эксплуатируемые при разных условиях и разного срока эксплуатации.

Исследования велись с целью определения возможности проведения контроля физико-механических свойств объекта методом ДИИ. Для достижения цели выполнены измерения образцов труб методом ДИИ, после чего сравнили с результатами, полученными методом инструментального индентирования (ИИ). Измерения физико-механических свойств для данного метода были проведены на изготовленных из образцов микрошлифах.

Метод ИИ реализован в отечественном продукте от ФГБНУ "ТИСНУМ" "НаноСкан", который определяет механические свойства изделий методом ИИ в соответствии с ГОСТ Р 8.748-2011. Во время проведения экспериментов использовался индентор типа Берковича, прикладываемая нагрузка на образец – 50 мН, время нагрузки – 10000 мс, время выдержки – 10000 мс. Для контроля методом ДИИ был использован прибор ИПМ-1К с индентером в форме сферы диаметром 3 мм.

Представлены результаты измерения твердости и модуля упругости методом ДИИ полиэтиленовой трубы и образца-свидетеля в виде микрошлифа на сканирующем нанотвердомере «НаноСкан» методом ИИ (рис. 1 и рис. 2).

На основе полученных данных была проведена корреляционная функция. Степень линейной взаимосвязи между полученными данными ДИИ и ИИ, твердости и модуля упругости, составила более 92 %.

По результатам исследования можно сделать вывод о наличии корреляции между результатами измерений твердости и модуля упругости разными методами, что позволяет

использовать портативные приборы, реализующие метод ДИИ, для контроля физико-механических свойств объекта на месте эксплуатации без нарушения его целостности.

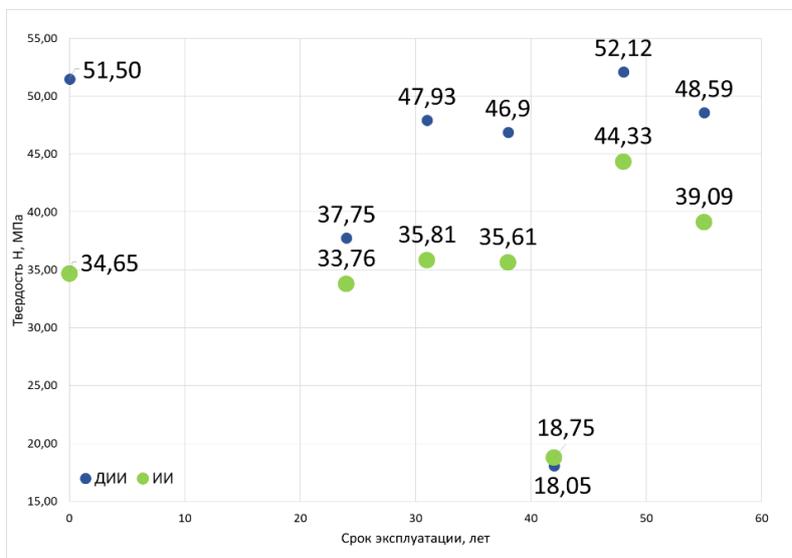


Рис. 1. Сравнение результатов измерения твердости методами ИИ и ДИИ

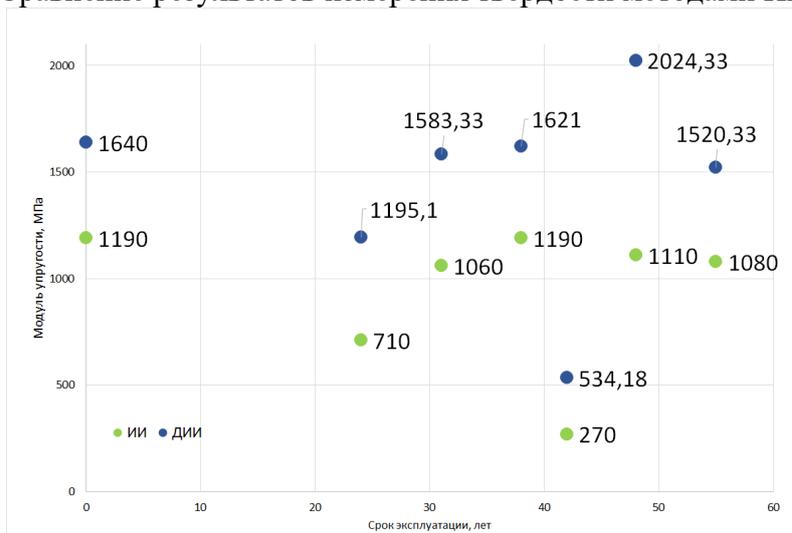


Рис. 2. Сравнение результатов измерения модуля упругости методами ИИ и ДИИ

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Umanskii A., Gogolinskii K., Syasko V., Golev A.* Modification of the Leeb Impact Device for Measuring Hardness by the Dynamic Instrumented Indentation Method // *Inventions*. 2022. V. 7. No. 1. P. 1-9.
2. *Колганов О.А., Ильинский А.В., Егоров Р.А., Хошев А.Е., Федоров А.В.* Дифференциальное включение катушек индуктивности для регистрации параметров движения ударника при динамическом индентировании // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2023. Т. 66. № 1. С. 74–80. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-1-74-80.
3. *Кузьмичев М.В., Егоров Р.А.* Моделирование и алгоритмическое обеспечение процесса динамического индентирования // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2018. Т. 18. № 5. С. 794–800. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-794-800.

## МЕТОДИКА СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ РАЗВИТИЯ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН РЕЛЬСОВ РАЗЛИЧНЫХ КАТЕГОРИЙ ТВЕРДОСТИ ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ

© 2025 г. Сергей Павлович Шляхтенков<sup>1\*</sup>, В.С. Выплавень<sup>1</sup>, Д.Б. Некрасов<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> – *АО «ЕВРАЗ ЗСМК», 654042 Новокузнецк, Космическое шоссе, д. 16*

\* - *shlyakhtenkow@gmail.com*

Сложившийся запрос на увеличение сроков между капитальными ремонтами рельсовых путей, тенденция увеличения грузонапряженности, интенсивности и скоростей движения определяют актуальность задачи продления срока службы рельсов. Это обуславливает необходимость совершенствования технологий повышения эксплуатационной износостойкости и сопротивляемости к образованию дефектов рельсов при их выплавке и обработке [1]. Закономерности образования и развития износов, трещин и выкрашиваний зависят не только от физико-механических свойств рельсовой стали, но также от геометрических параметров пути и эксплуатационных характеристик. Сравнительный анализ развития преддефектных состояний поверхности катания рельсов различных категорий твердости может быть проведен при условии сопоставимости условий эксплуатации и достоверности методов оценки параметров дефектов.

Цель работы – создание методики вихретокового контроля рельсов различных категорий твердости для сравнительной оценки развития трещин поверхности катания.

Исследования выполнялись в границах двух криволинейных участков пути одного перегона с близкими условиями эксплуатации и имеющими поверхностные повреждения в виде выкрашиваний и развитой сетки трещин. Во внутреннюю нить первого участка уложены рельсы категории ДТ350, второго участка – ДТ350НН. Для оценки параметров поверхностных трещин использовался вихретоковый метод. Контроль проводился для каждой кривой в 12 контрольных участках. Поверхность катания на всех контролируемых участках сканировалась на длине 100 мм вдоль продольной оси рельса со смещением на  $(15 \pm 1)$  мм от середины в сторону нерабочей выкружки рельса, так как в середине поверхности катания имеются развитые поверхностные выкрашивания. Ручным дефектоскопом Вектор-60Д проведена фиксация параметров сигналов от сетки трещин на амплитудно-фазовой развертке. Глубина трещин оценивалась косвенным методом, по методике, описанной в предыдущих исследованиях [2].

Далее для каждого участка оценивалось количество трещин, максимальная и средняя глубина, среднеквадратическое отклонение, проводился частотный анализ распределения трещин по глубине. Полученные результаты глубин в каждой кривой сравнивались между собой и с абсолютными значениями вертикального износа и глубины выкрашиваний. Также в работе

оценивалась критическая линейная плотность трещин в середине поверхности катания, с уже сформировавшимися выкрашиваниями.

Поверхностный слой головок рельсов категории ДТ350 1-го участка изношен менее равномерно, чем у рельсов 2-го участка категории ДТ350НН. Максимальные глубины трещин в границах 2-го участка находятся вблизи среднего уровня, а перекрытие доверительных границ погрешности глубины для большинства контрольных участков составляет от 20 до 95 %. Экспериментально вихретоковым методом показана зависимость между глубинами трещин и вертикальным износом. На 1-ом участке с рельсами ДТ350 интенсивность вертикального износа практически не влияет на развитие глубин сетки трещин, когда как скорость роста трещин на рельсах ДТ350НН сдерживается интенсивным вертикальным износом (рис. 1).

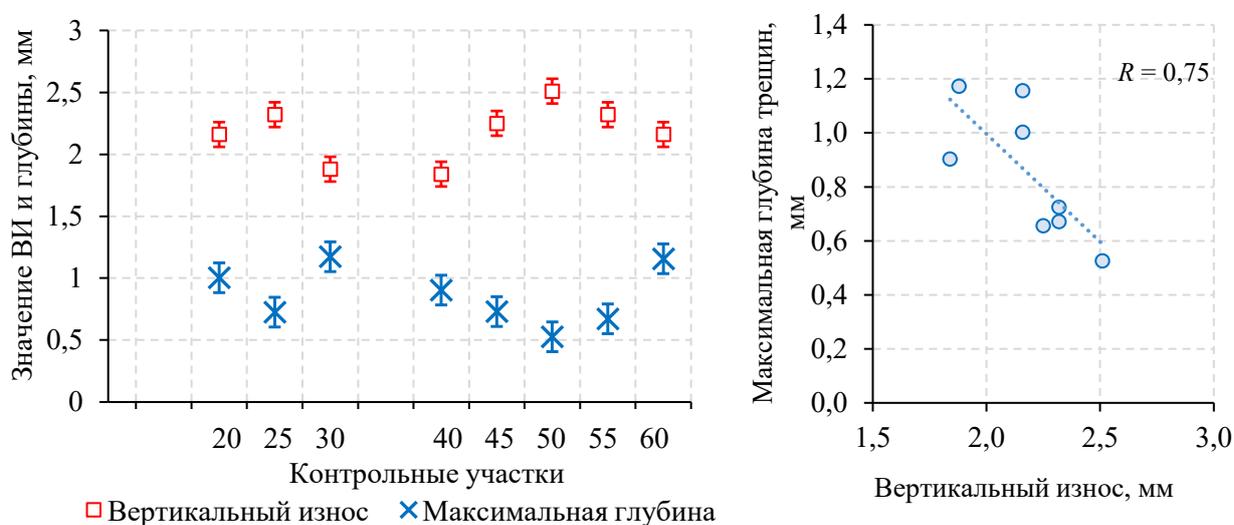


Рис. 1. Изменение глубины трещин и износа в зависимости от расположения контрольных участков в кривой (а) и график зависимости глубины трещин и износа (б)

Критерием для прогнозирования появления усталостных повреждений в виде выкрашиваний могут служить результаты мониторинга изменения линейной плотности трещин на единицу длины по мере наработки рельса, критическое значение которой, по предварительным оценкам, составляет 500 шт/м.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Токмакова Е.Н., Перков И.Е., Иванов П.В., Заграничек К.Л. Разработка рельсов новой категории для применения в особо тяжелых условиях эксплуатации // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2022. Т. 81. № 4. С. 339–346.
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 контактно-усталостных трещин поверхности катания рельсов // Дефектоскопия. 2023. № 4. С. 37–45.

## ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ПРИ КОНТРОЛЕ ЖЕСТКОСТИ УПРУГО-ДЕФОРМИРУЕМОГО ОСНОВАНИЯ

© 2025 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 настоящее время для контроля и обеспечения качества грунтовых оснований широко используются устройства, основанные на использовании ударно-динамических источников приложения нагрузки [1, 2]. Работа таких устройств сосредоточена на измерении значения прогиба грунта под нагрузочной плитой датчиком акселерометра. Жесткость оценивается только по максимальному (пиковому) значению прогиба. Подход, основанный на оценке пиковых значений, приводит к значительным ошибкам измерений [3]. Для решения этой проблемы используется метод обратной задачи. Это позволит учитывать как динамику процесса ударного нагружения, так и влияние неконтролируемых мешающих факторов, связанных с нелинейной жесткостью и просадкой грунта под нагрузкой.

Метод обратной задачи основан на математическом моделировании процесса ударно-динамического нагружения. Результатом моделирования являются значения ускорения скорости и перемещения нагрузочной плиты. Параметры модели учитывают нелинейную жесткость контролируемого основания и просадку от ударной нагрузки [4, 5]:

$$\begin{cases} m_1 \cdot x_1'' = -k_1 \cdot (x_1 - x_2) - m_1 \cdot g \\ (m_2 + \Delta m) \cdot x_2'' = -k_2(x_2) + k_1 \cdot (x_1 - x_2) - c_2 \cdot x_2' - (m_2 + \Delta m) \cdot g' \\ k_2(x_2) = k_{21} + k_{22} \cdot x_2, \\ x_3 = x_2 - \frac{F_{max}}{k_2}, \end{cases}$$

где  $m_1$  – масса падающего груза, кг;  $x_1$  – перемещение падающего груза, м;  $k_1$  – жесткость упругого элемента, расположенного на штампе, Н;  $m_2$  – масса штампа, кг;  $\Delta m$  – инерционная масса подвижного грунта, кг;  $x_2$  – перемещение штампа, м;  $k_{21}, k_{22}$  – коэффициенты функции жесткости основания  $k_2(x_2)$ ;  $c_2$  – коэффициент демпфирования основания, кг · с/м;  $x_3$  – просадка основания, м;  $F_{max}$  – максимальная нагрузка, при которой возникает просадка основания, Н.

После измерения ускорения нагрузочной плиты параметры модели подбираются таким образом, чтобы минимизировать разницу между смоделированными и экспериментальными сигналами. Это позволяет определить упругие характеристики грунта путем сопоставления модельных и экспериментальных результатов измерений.

Применимость метода численного решения обратной задачи исследовалась при сравнительных испытаниях измерения статического и динамического модуля деформации уложенного балласта железнодорожного пути. По результатам испытаний установлено, что

измерения динамического модуля деформации согласуются со значениями, полученными при статических испытаниях, с погрешностью не более 8 %. Также обнаружено влияние условий положения камней балласта под нагрузочной пластиной на результаты измерений.

#### 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. 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.
3. Adam C., Paulmichl I. Computational assessment of the dynamic load plate test with the light falling weight device // ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Rethymno, EU, 2007.
4. Выплавень В.С., Бехер С.А. Упруго-линейная модель динамического контроля жесткости балластного слоя железнодорожного пути // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 1. С. 4–13. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-4-13.
5. Выплавень В.С., Бехер С.А. Использование численного решения обратной задачи для совершенствования метода динамического штампа для контроля балластного слоя // Контроль. Диагностика. 2024. Т. 27. № 11(317). С. 4–13. DOI 10.14489/td.2024.11.pp.004-013.

# СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ К ВНУТРЕННИМ ДЕФЕКТАМ ПРОКАТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО И ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

© 2025 г. Алексей Леонидович Владыкин<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> – ФГБОУ ВО ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 426064 Ижевск, ул. Студенческая, д. 7

\* - pmkk@istu.ru

Акустический зеркально-теневое метода многократных отражений эффективно используется при контроле пруткового металлопроката малых диаметров [1, 2]. Преимущественно для контроля применяется проходной электромагнитно-акустический (ЭМА) преобразователь поперечных волн для ферромагнитного пруткового проката. Для контроля изделий из неферромагнитных материалов целесообразно использование пьезопреобразователей продольных волн на основе гибкой пленки типа поливинилиденфторид (ПВДФ) [3].

Цель работы – исследование сравнительной чувствительности акустического зеркально-теневое метода многократных отражений к внутренним дефектам проката при использовании ЭМА-преобразователя и пьезопреобразователя на основе ПВДФ.

В работе исследовался образец пруткового проката в виде цилиндра диаметром 25 мм и высотой 160 мм из стали 05X16 с реальным внутренним дефектом типа скворечник раскрытием 0,7×4 мм, расположенным по центру сечения (рис. 1а).

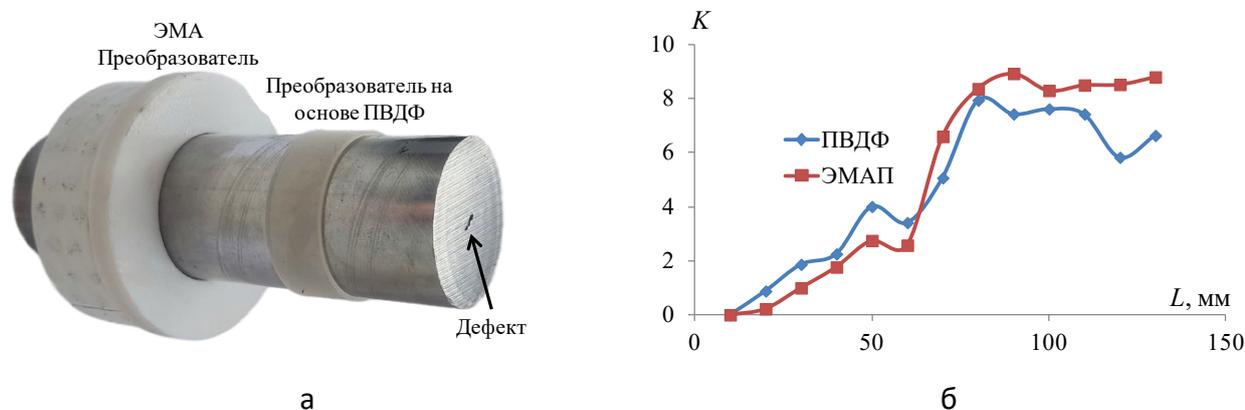


Рис. 1. Фото образца (а) и график зависимости многократного коэффициента выявляемости по длине ОК (б)

При исследованиях использовалась экспериментальная установка со специализированным проходным ЭМА-преобразователем поперечных волн осевой поляризации с рабочей частотой 2,5 МГц, а также ультразвуковой дефектоскоп DIO-1000 РА с пьезопреобразователем продольных волн на основе гибкой пьезопленки ПВДФ, устанавливаемый через контактную жидкость по периметру образца, с рабочей частотой 10 МГц. Сканирование образца двумя типами преобразователей производилось вдоль образующей

цилиндра с шагом 10 мм. По полученной осциллограмме серии импульсов многократных отражений рассчитывался многократный коэффициент выявляемости:

$$K = \sum_{n=1}^{N=10} \frac{U_{0n} - U_n}{U_{0n}} \quad (1)$$

где  $U_{0n}$  — значение амплитуды импульса при каждом  $n$ -м отражении для бездефектной области образца (опорный сигнал);  $U_n$  — значение амплитуды импульса при каждом  $n$ -ом отражении для области с дефектом;  $N$  — количество анализируемых отражений.

Поведение коэффициента выявляемости по длине образца при контроле с использованием ЭМА-преобразователя и преобразователя на основе ПВДФ носит идентичный характер (рис. 1б). В начале образца дефект отсутствует (коэффициент выявляемости соответствует бездефектной области), далее (до 50 мм) наблюдается его небольшое увеличение с резким ростом до 80 мм и стабилизацией в области максимальных значений от 80 до 140 мм.

Несмотря на наличие различий в физических принципах применения ЭМА-преобразователя и пьезопреобразователя на основе ПВДФ, идентичность поведения их информативных параметров говорит о возможности их замены в случаях, если чувствительность ЭМА-преобразователей является недостаточной.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FZZN-2025-0003) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Стрижак В.А., Хасанов Р.Р., Хомутов А.С., Торхов К.А., Пушин П.Н. Оценка чувствительности к дефектам и исследование скоростей волн в трубах-заготовках цилиндров глубинного штангового насоса волноводным акустическим методом // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2024. Т. 27. № 3. С. 86–100. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-3-86-100.
2. Муравьева О.В., Брестер А.Ф., Владыкин А.Л. Закономерности фокусировки поля проходного электромагнитно-акустического преобразователя поперечных волн // Контроль. Диагностика. 2023. Т. 26, № 9 (303). С. 27-41. DOI: 10.14489/td.2023.09.pp.027-041.
3. 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 YZXMLMH.

# ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ СОЗДАНИИ ДАТЧИКОВ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

© 2025 г. Татьяна Сергеевна Абрамова<sup>1\*</sup>, М.А. Гуляев<sup>1</sup>

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

\* - *t.abramova\_sgups@mail.ru*

**Введение.** Измерение деформаций, возникающих в объектах под воздействием механических, тепловых и других нагрузок, всегда является актуальной задачей [1-3]. Один из распространенных методов измерения деформаций — это тензометрический. Для измерения используют как пленочные тензорезисторы, так и съемные тензодатчики. Последние на сегодняшний день изготавливаются из металла, что достаточно дорого и трудоемко, так как необходимо обеспечить точность изготовления. В упрощении процесса изготовления таких датчиков помогут аддитивные технологии. Из существующих видов трехмерной печати метод SLA (Laser Stereolithography) позволяет печатать детали с точностью до 15 микрон. Такой вид печати основан на постепенном выращивании элемента из фотополимерной смолы с помощью УФ-излучения.

**Цель исследования** – спроектировать и реализовать упругий элемент съемного тензометрического преобразователя, изготовленного из пластика.

**Материалы и оборудование.** При проектировании за основу брались существующие конструкции тензодатчиков и принцип их работы. Моделирование упругого элемента выполнялось в среде «Компас 3D», а статический анализ конструкции – в среде «SolidWorks». Внешний вид упругого элемента представлена на рис.1.

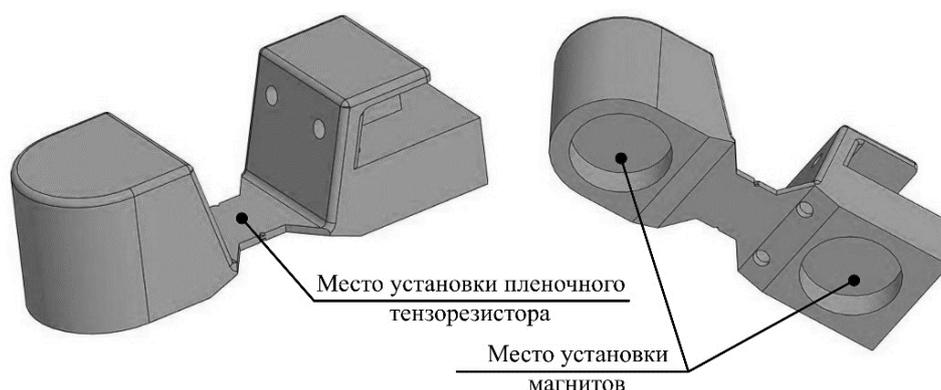


Рис. 1. Внешний вид упругого элемента

Чувствительный элемент представляет собой балку переменного сечения и предполагает работу по схеме одиночного тензорезистора. Элемент выполнен на фотополимерном 3D-принтере методом лазерной стереолитографии. В качестве материала использована уретан-акрилатная фотоотверждаемая смола марки eSUN Hard-Tough Resin.

На площадку толщиной 0,6 мм наклеивался пленочный тензорезистор КФ5П1-1-100-Б-23, установка на объект контроля происходит с помощью магнитов. Проведены сравнительные испытания собранного упругого элемента с пленочным тензорезистором, размещенном на объекте, который подвергался нагрузке и разгрузке с шагом 5 кН.

**Анализ результатов.** Сравнительные испытания показали, что можно использовать данный метод изготовления упругих элементов для датчиков относительных деформаций. Но есть ограничения при использовании такого материала: измерения можно проводить на небольших значениях тока, так как пластик плохо отводит тепло, из-за чего пленочные тензорезисторы перегреваются и выходят из строя. Для использования на больших значениях тока необходимо предусмотреть возможность отвода тепла от упругого элемента.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Арефьева К.В., Мартыненко Л.В.* Оценка влияния ходовой части грузового вагона на рельсошпальную решетку в процессе эксплуатации с помощью тензометрических датчиков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2(78). С. 145–155.
2. *Игнатик А.А.* Лабораторное исследование напряженно-деформированного состояния поперечного сечения трубы при воздействии изгибающей нагрузки // Наука и техника в газовой промышленности. 2023. № 3(95). С. 71–83.
3. *Тимохин И.Ю., Анашкина А.А., Харахонов Г.А., Ермолаев Я.О.* Измерение сил резания в процессе механической обработки керамических деталей авиационного назначения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2023. № 6(759). С. 47–57.

## ОСОБЕННОСТИ НАСТРОЙКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЬНЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НАДВОДНЫХ СУДОВ

© 2025 г. Никита Валерьевич Васильев<sup>1\*</sup>, В.Н. Коншина<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup> – ФГБОУ ВО ПГУПС, 190031 Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9

\* - [i@pacman121212.ru](mailto:i@pacman121212.ru); \*\* - [vera.konshina@gmail.com](mailto:vera.konshina@gmail.com)

Цель работы состоит в анализе способа настройки чувствительности при ультразвуковом контроле сварных соединений стальных корпусных конструкций надводных судов, описанного в ОСТ 5Р.1093-93 [1].

Требования к качеству сварных соединений стальных корпусных конструкций надводных судов по результатам ультразвукового контроля содержатся в ОСТ 5Р.1093-93 [1]. Согласно ОСТ 5Р. 1093-93 [1], оценку качества сварных соединений следует производить по результатам контроля, выполненного на поисковой чувствительности, соответствующей условной чувствительности, настроенной по стандартному образцу СО-1 по ГОСТ 14782 [2] от бокового цилиндрического отверстия (далее – БЦО) на глубине 25 или 35 мм (в зависимости от толщины контролируемого изделия). Браковочная чувствительность соответствует условной чувствительности, настроенной по эталону СО-1 от БЦО на глубине 15 или 25 мм.

Указанный способ обладает рядом недостатков, связанных с плохой воспроизводимостью акустических характеристик оргстекла, из которого выполнен СО-1 [3]. Но основным недостатком является нелегитимность применения СО-1 в Российской Федерации, так как ГОСТ 14782 [2] не действует на территории Российской Федерации (заменен на ГОСТ Р 55724 [4], в котором СО-1 отсутствует). Также при рассмотрении метода настройки чувствительности возникает вопрос о его корректности, поскольку для разных глубин выявляемых дефектов (зон контроля) и углов ввода следует настраивать браковочную чувствительность по одному БЦО в СО-1 (расположенному на одной и той же глубине).

Для того чтобы решить вопрос, связанный со способом настройки чувствительности по ОСТ 5Р.1093-93 [1], нужно перейти от условной чувствительности  $K_u$  в мм по СО-1 к предельной чувствительности в  $\text{мм}^2$ , поскольку именно она покажет, какой минимальной эквивалентной площади будут выявляться отражатели на разных глубинах в сварном соединении, при данной настройке аппаратуры.

Используя измеренные значения амплитуд сигналов от БЦО диаметром 2 мм в трех образцах СО-1 и в мере СО-2 от БЦО диаметром 6 мм на глубине 44 мм для трех пьезоэлектрических преобразователей, были рассчитаны коэффициенты выявляемости  $K_d$  для БЦО в СО-1 относительно БЦО в СО-2.

По известным формулам акустического тракта [2, 5], были получены значения предельной чувствительности, выраженной площадью плоскодонного отражателя, для глубин залегания отражателей (дефектов) 30, 40 и 70 мм, что соответствует контролю сварного соединения толщиной 40 мм прямым и однократно отраженным лучом. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты расчета значений предельной чувствительности**

| Угол ввода, град | Частота ультразвуковых колебаний, МГц | Диаметр пьезопластины, мм | Глубина залегание бокового цилиндрического отверстия в стандартном образце СО-1, мм | Значения предельной чувствительности, мм <sup>2</sup> (для глубин залегания отражателя 30, 40 и 70 мм) |     |      |
|------------------|---------------------------------------|---------------------------|---|--|-----|------|
|                  |                                       |                           |   |  |     |      |
| 50               | 2,5                                   | 10                        | 25  | 2,6  | 4,2 | 11,5 |
|                  |                                       |                           | 35  | 0,7  | 1,2 | 3,3  |
| 50               | 2,5                                   | 12                        | 25  | 3,3  | 6,3 | 14,5 |
|                  |                                       |                           | 35  | 1,0  | 2,0 | 4,6  |
| 65               | 2,5                                   | 12                        | 25  | 4,7  | 8,0 | 22,7 |
|                  |                                       |                           | 35  | 1,4  | 2,3 | 6,7  |

Результаты, представленные в табл. 1, показывают, что, как уже отмечено выше, при одной и той же условной чувствительности предельная чувствительность для разных зон контроля и углов ввода неодинакова, что отрицательно влияет на правильность оценки качества сварных соединений.

Полученные в ходе исследования данные говорят о том, что способ настройки чувствительности, описанный в ОСТ 5Р.1093-93 [1], некорректен и что необходим пересмотр данного документа или его замена.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ОСТ 5Р.1093-93. Соединения сварные стальных корпусных конструкций надводных судов. Правила контроля.
2. ГОСТ 14782-86. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые.
3. Щербинский В.Г. Технология ультразвукового контроля сварных соединений М.: Тиссо, 2005. 326 с.
4. ГОСТ Р 55724-2013. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые.
5. Гурвич А.К., Кузьмина Л.И. Справочные диаграммы направленности искателей ультразвуковых дефектоскопов. К.: Техніка, 1980. 101 с.

## УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ КАПРОЛОНА ЭХО-МЕТОДОМ

© 2025 г. Павел Сергеевич Корепанов<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> – ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашикова», 426069 Ижевск, ул. Студенческая, д. 7

\* - [pmkk@istu.ru](mailto:pmkk@istu.ru)

Полиамид-6 блочный (ПА-6 блочный) или капролон – высокомолекулярный конструкционный полимер, обладающий следующими физическими характеристиками: высокие механическая прочность, твердость и износостойкость, малая плотность, низкий коэффициент трения. Имеющиеся свойства позволяют изготавливать из капролона кольца, втулки, подшипники и прочие элементы взамен алюминиевым, бронзовым и латунным.

С ростом спроса на капролон появляется потребность его контроля на наличие различных дефектов – предпочтительным являются ультразвуковые методы контроля в виду своей универсальности, невысокой стоимости и безопасности. Однако перед началом применения ультразвукового контроля необходимо оценить контролепригодность объекта: определить акустические и физические свойства материала.

В качестве образцов исследованы блоки капролона различных размеров от 35 мм до 110 мм; в одном из образцов был изготовлен боковой цилиндрический отражатель (БЦО) диаметром 1 мм, при этом расстояние от поверхности до БЦО с одной стороны составляло 34,5 мм, а с другой – 65,5 мм.

Излучение и прием ультразвуковой волны осуществлялись с помощью дефектоскопа УДС2-52 «ЗОНД-2» и прямого пьезоэлектрического преобразователя П111-2,5-12. Данный дефектоскоп позволяет создавать импульс возбуждения амплитудой до 480 В, что важно при контроле материалов с высоким коэффициентом затухания.

Определение плотности капролона производилось методом гидростатического взвешивания посредством аналитических весов AND HR251AZG. Полученное значение плотности составило 1159,3 кг, что соответствует техническим условиям на капролон.

Скорость распространения продольной ультразвуковой волны в капролоне была определена с использованием встроенной в дефектоскопе функции. По результатам более чем 70 измерений скорость волны в ПА-6 блочном составила  $C_l = (2757,4 \pm 6,0)$  м/с.

Определение коэффициента затухания осуществлялось посредством измерения амплитуды первых двух, а там, где это возможно, – трех донных импульсов. Измеряя амплитуду донных импульсов разного порядка, можем получить формулу (1):

$$\delta = \frac{\ln \frac{U_1}{U_2} - \ln \frac{r_2}{r_1}}{r_2 - r_1} = \frac{\Delta U}{8,69} - \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (1)$$

где  $U_1$  и  $U_2$  – амплитуды донных импульсов разного порядка,  $\Delta U$  – отношение амплитуд донных импульсов, дБ;  $B$ ;  $r_1$  и  $r_2$  – расстояния, проходимые волной в образце ( $r_2 > r_1$ ), м.

По результатам эксперимента коэффициент затухания на частоте 2,5 МГц составил  $\delta = (40,5 \pm 0,6)$  Нп/м. Так, коэффициент затухания в капролоне значительно выше, чем в стали ( $\delta_{ст} = 0,1 \div 10$  Нп/м), в 2–3 раза выше, чем в оргстекле ( $\delta_{орг} = 20 \div 30$  Нп/м). Данное явление может быть обусловлено поглощением в полимерной матрице и рассеянием на углеродных волокнах. Поглощение происходит из-за перехода энергии ультразвуковых волн в колебательную и вращательную энергии полимерных молекулярных цепочек. Особенности межмолекулярного взаимодействия и наличие длинных молекулярных цепей приводят к появлению релаксационных процессов, что, в свою очередь, отражается в виде высокого коэффициента затухания [1].

Были измерены амплитуды сигналов от БЦО в капролоне  $U_K$ , диаметром 1 мм на глубинах 34,5 мм и 65,5 мм, и на стандартном образце СО-2  $U_{CO}$ , диаметром 6 мм на глубине 44 мм, и найдена разность между ними в дБ. Для сравнения было рассчитано теоретическое значение, по формуле акустического тракта (2):

$$\frac{A}{A_0} = \frac{S}{2\lambda} \sqrt{\frac{d}{2r^3}} e^{-2\delta r}, \quad (2)$$

где  $A$  – амплитуда сигнала, отраженного от дефекта, В;  $A_0$  – амплитуда зондирующего импульса, В;  $S$  – площадь излучателя, м<sup>2</sup>;  $\lambda$  – длина волны, м;  $d$  – диаметр цилиндрического отражателя, м.

Таблица 1

**Отношение амплитуд сигналов от дефектов в стали и капролоне**

| Толщина капролона /<br>стали, мм | Экспериментальные   | Теоретические                    |
|----------------------------------|---------------------|----------------------------------|
|                                  | $U_{CO} - U_K$ , дБ | $20 \lg \frac{A_{CO}}{A_K}$ , дБ |
| 34,5 / 44                        | 20,8                | 22,1                             |
| 65,5 / 44                        | 52,0                | 52,3                             |

Проведенное исследование показало возможность применения ультразвукового эхо-метода для выявления дефектов, эквивалентных БЦО диаметром 1 мм в капролоне при использовании пьезоэлектрических преобразователей с частотой 2,5 МГц.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Карбутов А.А., Подымова Н.Б., Соколовская Ю.Г.* Локальные соотношения Крамерса-Кронига для коэффициента затухания и фазовой скорости продольных ультразвуковых волн в полимерных композитах // *Акустический журнал*. 2019. Т. 65. № 2. С. 182–189.

## ОСОБЕННОСТИ МАНГИТОАНИЗОТРОПНОГО ЭФФЕКТА ПРИ ДВУХОСНОМ НАГРУЖЕНИИ СТАЛИ

© 2025 г. Роман Александрович Соколов<sup>1\*</sup>, К.Р. Муратов<sup>1,2\*\*</sup>, Д.А. Хренов<sup>1\*\*\*</sup>

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

\* - [falcon.rs@mail.ru](mailto:falcon.rs@mail.ru); \*\* - [muratows@mail.ru](mailto:muratows@mail.ru); \*\*\* - [e-mail3](mailto:e-mail3)

Современные технологии в области регистрации остаточных механических напряжений в ферромагнитных сталях требуют глубокого понимания физических процессов, протекающих в материале. Одним из ключевых явлений, определяющих поведение таких ферромагнитных материалов, является магнитоанізотропный эффект [1-3] – зависимость магнитных характеристик вещества от пространственного направления.

Особое значение в контексте промышленных приложений приобретает магнитоупругая анизотропия, возникающая вследствие действия в материале остаточных механических напряжений [3-6]. В настоящее время методы неразрушающего контроля (НК), направленные на регистрацию таких напряжений в железоуглеродистых сплавах, активно внедряются крупными производителями [6].

Интеграция знаний о магнитоанізотропии в прикладные задачи, такие как прогнозирование долговечности конструкционных сталей, где остаточные напряжения напрямую влияют на магнитоупругий отклик материала, позволят сократить аварийность на предприятиях [4-6]. Однако существующие на сегодняшний день исследования ограничиваются рассмотрением магнитоанізотропного эффекта для случаев действия простых одноосных нагрузок на исследуемые образцы.

Целью работы является изучение особенностей магнитоанізотропного эффекта при сложном нагружении образца для определения внутренних механических напряжений в сталях.

Для проведения исследований использовался образец, выполненный в форме креста из стали марки Ст3 в состоянии поставки. Габаритные размеры образца: 290×12×290 мм. Механическое нагружение производилось на лабораторном стенде с возможностью приложения регулируемой нагрузки в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Для регистрации магнитоанізотропного эффекта использовался преобразователь с магнитопроводом крестовидной формы с двумя обмотками: 1. Измерительной; 2. Возбуждающей. Частота входного сигнала на возбуждающую катушку составляла 1000 Гц. Результаты, полученные после проведения серии испытаний, представлены на рис. 1.

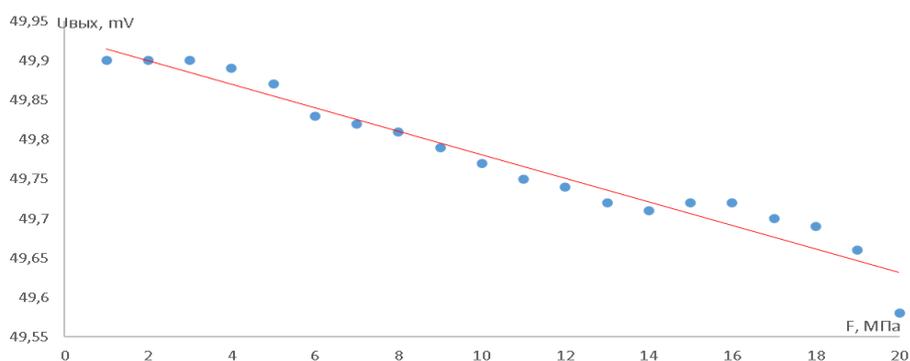


Рис. 1. Зависимость амплитуды выходного сигнала датчика от величины двухосной нагрузки ( $f = 1000$  Гц,  $U_{вх} = 2,0267$  В)

По результатам проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы. При двухосном нагружении выходная характеристика изменялась существенно слабее, чем при одноосном, что указывает на влияние типа нагрузки на распределение механических напряжений в материале. В случае равных нагрузок по вертикальной и горизонтальной осям выходной сигнал магнитоанизотропного преобразователя изменяется монотонно, однако динамика изменения говорит о изначально неравномерном распределении напряжений в структуре образца.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Филиппов Б.Н., Танкеев А.П. Динамические эффекты в ферромагнетиках с доменной структурой. Москва: Наука, 1987. 207 с.
2. Белов К.П. Магнитострикционные явления и их техническое применение. Москва: Наука, 1987. 160 с.
3. Задворкин С.М., Горулева Л.С. Оценка остаточных напряжений в стальных изделиях магнитными методами // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2021. № 2. С. 33–51.
4. Никулин В.Е., Евстратикова Я.И. Контроль остаточных сварочных напряжений с помощью магнитоанизотропного метода после ультразвуковой ударной обработки // Сварка и диагностика. 2019. № 4. С. 33–51.
5. Жадобин Н.Е., Лебедев А.И., Волков В.П. Датчики механических напряжений на основе магнитоупругого эффекта // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: сборник научных трудов ПГУ. Пенза, 2013. С. 290–292.
6. Болобов В.И., Кривокрысенко Е.А., Попов Г.Г., Никулин В.Е. Определение величины остаточных напряжений в металлоконструкциях методом магнитной анизотропии. // Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса: сборник научных трудов Санкт-Петербургского Горного Университета. Санкт-Петербург, 2020. С. 1004–1009.