



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



УрО РАН



ИМАШ УрО РАН



Уральский  
федеральный  
университет  
имени первого Президента  
России Б. Н. Ельцина



пермский  
политех



# ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

## XXXIV Уральская конференция с международным участием

### ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ (ЯНУСОВСКИЕ ЧТЕНИЯ)

г. Пермь

20-21 апреля 2023 г.

## **Физические методы неразрушающего контроля**

### **(Янусовские чтения)**

Тезисы докладов XXXIV Уральской конференции с международным участием

г. Пермь, 2023

#### **ПРЕДСЕДАТЕЛЬ ОРГКОМИТЕТА**

Сморodinский 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**

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

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

Велько Н. А., ЗАО «ЗУАЦ», г. Пермь

Кинжагулов И. Ю., к.т.н., учреждение науки «ИКЦ СЭКТ», г. Санкт-Петербург

Клюев С. В., к.э.н., МНПО «Спектр», г. Москва

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

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

Петров А. Ю., к.т.н., РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Москва

Поволоцкая А. М., к.т.н., ИМАШ 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

Сташков А. Н., к.т.н., ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург

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

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

г. Пермь, ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

## СОДЕРЖАНИЕ

СТРАТЕГИЯ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ В. А. Сясько, К. В. Гоголинский	7
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ АКУСТИЧЕСКИХ И УПРУГИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ В. В. Муравьев	9
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАДИЙ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛА ПО ДАННЫМ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ Т. В. Игумнова, С. А. Бехер, М. А. Гуляев	12
ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА МНОГОКРАТНОЙ ТЕНИ ПРИ КОНТРОЛЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ О. В. Муравьева	14
ВЫЯВЛЕНИЕ ДИФфуЗИОННЫХ ПРОСЛОЕК РАЗНОРОДНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В. А. Барат, А. Ю. Марченков, М. В. Карпова, В. В. Бардаков, С. В. Елизаров	17
ПРИБОРНЫЕ РАЗРАБОТКИ ИФМ УРО РАН ДЛЯ ЛОКАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА АУСТЕНИТНЫХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СТАЛЕЙ М. Б. Ригмант, М. К. Корх, А. В. Кочнев	19
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ЧЕРЕЗ УТОЛЩЕННУЮ АУСТЕНИТНУЮ НАПЛАВКУ И. В. Михайлов, А. Н. Разыграев, Н. П. Разыграев	21
КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ СИЛОВОЙ РАМЫ ПРЕССА МЕТОДАМИ ТЕНЗОМЕТРИИ С. А. Бехер, С. П. Шляхтенков, В. В. Выплавень, М. А. Гуляев, А. А. Попков	24
ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ УСЛОВИЙ НА ПАРАМЕТРЫ И КАЧЕСТВО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ РЕЛЬСОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ А. Л. Бобров, К. И. Гончаров	26
ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПАЙКИ БОКОВЫХ СТенок МЕДНЫХ ТОКОВЕДУЩИХ СОЕДИНЕНИЙ ОБМОТОК СТАТОРОВ ГИДРО- И ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ А. Н. Сташков, Л. Х. Коган, А. П. Ничипурук	28
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИНДИВИДУАЛЬНОГО ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КОРОС-333 Р. М. Абашев, В. С. Красноперов, И. И. Мильман, Е. В. Моисейкин, А. И. Сюрдо	30
МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ КОРРОЗИОННОГО МОНИТОРИНГА БЕЗ СНЯТИЯ ЛЕНТОЧНОГО ПОКРЫТИЯ С ТРУБОПРОВОДОВ А. В. Катташева, И. А. Ридель, Д. С. Кирпиченко	32
НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ Ю. Л. Гобов	34
ИЗМЕРЕНИЕ СТЕПЕНИ ПРОПАЯННОСТИ СОЕДИНЕНИЯ ТОКОВЕДУЩИХ ШИН ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТАНГЕНЦИАЛЬНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С АКТИВНЫМ ЭКРАНИРОВАНИЕМ А. Е. Горбунов, А. Е. Ивкин, П. В. Соломенчук	36

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ОБЛАСТИ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДИКИ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ МАГНИТОСТАТИКИ МЕТОДОМ ПОСТРОЕНИЯ МАГНИТНЫХ ЛИНИЙ В ЗОНЕ ДЕФЕКТА А. В. Никитин, А. В. Михайлов, Л. В. Михайлов, Ю. Л. Гобов, В. Н. Костин, Я. Г. Смородинский	38
НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ОПТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА М. Ю. Федотов	40
МАГНИТОПОРОШКОВЫЙ КОНТРОЛЬ БАНДАЖА КОЛЕСНОЙ ПАРЫ ЛОКОМОТИВА: НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОСНАСТКА Р. А. Ахмеджанов	42
МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ НЕЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕГО ПОКРЫТИЯ НА НЕМАГНИТНОМ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕМ ОСНОВАНИИ С АВТОМАТИЧЕСКИМ УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ОСНОВАНИЯ М. В. Сясько, И. П. Соловьев, П. В. Соломенчук	44
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ СКАНЕР СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД В. В. Мирошников, Н. В. Гречишкина, В. Н. Водолазский	46
ПОВЫШЕНИЕ СТРУКТУРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ СТАЛЕЙ С. Г. Сандомирский	48
ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ МОЛОДЕЖНОЙ ШКОЛЫ	50
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕШАЮЩИХ ФАКТОРОВ РУЧНОГО ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ГЛУБИНЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН РЕЛЬСОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ С. П. Шляхтенков, С. А. Бехер	51
МАТРИЧНЫЙ ВИХРЕТОКОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНДУКТИВНОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА Ю. Я. Реутов, А. В. Михайлов, Л. В. Михайлов	53
ВХОДНОЙ КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАСТИКОВОЙ ПРОВОЛОКИ НА АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ Т. С. Абрамова, С. А. Бехер	55
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МЕШАЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ СПЛОШНОСТИ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ МЕТОДОМ И. С. Гнивуш, В. А. Сясько, А. С. Мусихин	57
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ А. С. Голев, К. В. Гоголинский, А. С. Уманский	58
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО КОНТРОЛЯ ВНЕШНЕГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБ В ПОТОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ Д. И. Антонов, В. А. Сясько	60

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ПРОСТРЕЛЬНЫХ МИШЕНЕЙ РЕНТГЕНОВСКИХ ТРУБОК ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ А. А. Александрова, А. Ю. Грязнов	62
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МЕХАНИЗИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ МЕТОДАМИ ФР+ТОФД С ПРИМЕНЕНИЕМ ДЕФЕКТΟΣКОПА УСД-60ФР-16/128 Д. А. Адебайо, М. П. Савичев, В. В. Атрощенко	64
ВОЗМОЖНОСТЬ ОЦЕНКИ ФАЗОВОГО СОСТАВА АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ М. К. Корх, А. В. Кочнев, М. Б. Ригмант	66
ИССЛЕДОВАНИЕ СОВЕРШЕНСТВА СТРУКТУРЫ КРИСТАЛЛОВ $LiCaAlF_6$ МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНОЙ АКУСТИКИ Е. Б. Желева, В. В. Семашко, А. А. Шавельев, О. А. Морозов, В. М. Кяшкин, А. А. Карабутов, Ю. П. Бродниковский	68
МОНИТОРИНГ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБУЧЕНИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ Д. И. Школина, С. А. Бехер	70
ОПЫТ КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНЫХ БАЛОК АВТОМОБИЛЬНОГО МОСТА В. С. Мальцев, С. М. Кулак, В. Ф. Новиков	72
МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТА КАНАТА НА СПЕКТР ЕГО СВОБОДНЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ И. А. Шаропина, К. Р. Муратов, И. С. Бевзюк	74
ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КРИВОЙ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА Р. А. Соколов, К. Р. Муратов, В. Ф. Новиков	76
ФОРМИРОВАНИЕ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ОБРАЗОВ НАПЛАВЛЕННОГО СЛОЯ В ПРОЦЕССЕ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ Д. О. Кузиванов, А. В. Федоров, И. Ю. Кинжагулов, К. А. Степанова	78
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СФЕРОПЛАСТИКОВ Д. Р. Фирюлин, И. Ю. Кинжагулов	80
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ А. М. Шмаков, А. В. Федоров	82
ПОВЫШЕНИЕ ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ВОСПРОИЗВОДИМОГО СИГНАЛА В ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ Е. И. Дьячковский, И. Ю. Кинжагулов, З. А. Велеулов	84
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩИМИ МЕТОДАМИ А. А. Тарасова, А. В. Мельникова, К. В. Гоголинский	86

РАЗРАБОТКА МАКЕТА ДАТЧИКА ДЛЯ ПРИБОРА ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ	88
О. А. Колганов, А. Е. Хошев, Р. А. Егоров, А. В. Фёдоров, Г. Н. Лукьянов	
РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ РЕГИСТРАЦИИ ДВИЖЕНИЯ УДАРНИКА ПЕРВИЧНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ИНДЕНТИРОВАНИИ	90
А. Е. Хошев, О. А. Колганов, А. В. Федоров	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ СТЕРЕОЗРЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЯ ДО ОБЪЕКТОВ В СИСТЕМАХ ВИДЕОИНСПЕКЦИИ	92
В. В. Коняшов, А. С. Сергеев, А. В. Федоров	
РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДВИЖЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ УСТАНОВКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ	94
В. В. Малый, А. С. Костюхин, А. В. Федоров, И. Ю. Кинжагулов	
КОНТРОЛЬ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СПЕЦИАЛЬНЫХ ТРУБАХ В ПРОЦЕССЕ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ	96
И. Е. Алифанова, А. В. Федоров, В. А. Быченко, И. В. Беркутов	
ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ СПЛАВЛЕНИЕМ	98
А. С. Сергеев, В. В. Коняшов, А. В. Федоров	
ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ С РАЗЛИЧНЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ СВОЙСТВАМИ НА ПРИМЕРЕ ENP ПОКРЫТИЙ	100
В. В. Алехнович, К. В. Гоголинский	
НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ГРАФИТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ТОРЦОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ	103
К. В. Захаров, А. Д. Фокина, В. А. Захаров	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВС-СПЛАВА НЕРАЗРУШАЮЩИМ МЕТОДОМ	105
К. В. Захаров, Д. Е. Андреев, М. Ю. Ширяева, В. А. Захаров, О. Б. Яременко	
НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ В СЛАБЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТАХ	107
Е. С. Лосева, И. Н. Лозовский, В. А. Сясько	
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ТРУБ И ЛИСТОВ В ИСПОЛЬЗОВАНИЕ SH И TH ВОЛН	109
Л. В. Волкова, А. М. Решетникова, В. А. Макарова, Р. Ю. Егоров	

## СТРАТЕГИЯ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

© 2023 г. Владимир Александрович Сясько<sup>1\*</sup>, К. В. Гоголинский<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup> – РОНКТД, 119048 г. Москва, ул. Усачева, д. 35

<sup>2</sup> – Санкт-Петербургский горный университет, 199106 г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2 корпус

\* - 9334343@gmail.com; \*\* - gogolinskiy\_kv@pers.spmi.ru

В последние годы в большинстве промышленно развитых стран приняты проекты комплексной цифровизации всех сфер деятельности, которые в своей сути являются стратегическими инициативами по развитию прежде всего энергетики и машиностроения как основы современной экономики [1, 2]. Эти проекты должны как губка впитать современные информационные и коммуникационные технологии. Технической основой для этого будут технологии распределенной обработки цифровых данных, с помощью которых вычислительные ресурсы предоставляются интернет-пользователю как онлайн-сервис (облачные технологии) и организованные на их базе интеллектуальные системы, объединенные в единую цифровую сеть [3]. Объективная необходимость встраивания методов, технологий и оборудования НК и МС в умные распределенные процессы проектирования, производства, строительства и эксплуатации умных инфраструктурных объектов сформировала *новое междисциплинарное научно-техническое направление NDE 4.0*. Ключевой является идея встраивания средств и технологий НК в кибер-физические системы умных производств и распределенные инфраструктурные объекты, реализующих принципы организации единого физического и информационного пространства с использованием облачных технологий в части стандартизации, метрологии, микроэлектроники, физики, материаловедения и других направлений [4].

В докладе рассмотрены основные положения, касающиеся специфики информационных облачных сервисов встроенных средств и систем НК, реализующих процедуры мониторинга состояния и технического диагностирования умных инфраструктурных объектов и производств, вопросы единства и специфики стандартизации и метрологического обеспечения, основные элементы этих облачных сервисов. Изложены цели и задачи разработки, а также вопросы, требующие согласования со специалистами, занимающимися разработкой и эксплуатацией аналогичных облачных сервисов умных инфраструктурных объектов и производств. Приведена реализуемая в настоящее время одна из возможных структур цифровой системы НК и МС на базе облачного аналитического модуля «*Metrology cloud*», а также проанализированы ключевые элементы цифровой трансформации НК и МС. Описаны принципы интеграции рассматриваемых систем НК и МС в единую цифровую цепь разработки, производства структурных элементов и эксплуатации умного инфраструктурного объекта при использовании риск-ориентированного подхода. При этом разработка инфраструктурного объекта, процессов и технологии

изготовления его составных элементов, эксплуатации и обслуживания, а также систем НК, МС и ТД представляет собой единое целое (*Digital end-to-end engineering across the entire value chain of both the product and the associated manufacturing system*), основанное на единых принципах стандартизации и метрологического обеспечения [5, 6].

Рассмотрена структура системы многопараметрового неразрушающего контроля умных инфраструктурных объектов и производств, использующих облачные технологии как базовые элементы ее составных частей. Сформулирована цель развития национального облака НК: построение сетей связанных интеллектуальных датчиков, образующих большие системы, встроенные в инфраструктуру распределенных «умных» производств и инфраструктурных объектов, развитие смежных инженерных дисциплин как основы обеспечения автономного долговременного функционирования этих систем на базе реалистичных моделей средств НК, МС и ТД, встроенных в робототехнические комплексы и структурные элементы инфраструктурных объектов, использующих глубокое/машинное обучение с последующей реализацией принципов искусственного интеллекта при НК, МС и ТД с учетом трендов INDUSTRY 4.0. Решение задач, связанных с переходом от автоматизированного к автоматическим НК, МС и ТД в пределах полного жизненного цикла сложных технических систем и ближайшие задачи: участие в создании российского информационного метрологического облака в части НК, МС и ТД; разработка многопараметрического классификатора оборудования НК и ТД; разработка единых стандартов для умных (smart) и интеллектуальных средств НК, МС и ТД; разработка единых подходов к аттестации цифровых двойников и виртуальных приборов; разработка единых подходов к аттестации средств НК и методик МС и ТД.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Wolfgang A. Halang, Herwig Unger: Industrie 4.0 und Echtzeit.* 2014, Springer Vieweg, [ISBN 978-3-662-45108-3](#),
2. <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/EN/Home/home.html>.
3. [https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/zwei-faktenblatt-rami.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/zwei-faktenblatt-rami.pdf?__blob=publicationFile&v=4).
4. *Horn A. Zehn Jahre Industrie 4.0: Null Produktivitätsfortschritt // Telepolis.* 2021. 13. <https://www.heise.de/tp/features/Zehn-Jahre-Industrie-4-0-Null-Produktivitaetsfortschritt-6189847.html>.
5. *Сясько В.А. NDE 4.0& Итог десятилетия // Территория НДТ.* 2022. № 4. С. 30–42.
6. *Gogolinskiy K., Syasko V. Prospects and challenges of the Forth Industrial Revolution for instrument engineering and metrology in the field of non-destructive testing and condition monitoring // Insight.* 2019. No. 8. P. 434–447.



# ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ АКУСТИЧЕСКИХ И УПРУГИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

© 2023 г. Виталий Васильевич Муравьев<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> – ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», 426069 г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7  
\* - [pmkk@istu.ru](mailto:pmkk@istu.ru)

Надежность и долговечность технических изделий машиностроения, металлургии, нефтяной промышленности, железнодорожного транспорта в значительной степени зависят от результатов их диагностирования и неразрушающего контроля (НК). Весьма перспективным направлением повышения возможностей и информативности ультразвуковых методов НК является использование бесконтактных электромагнитно-акустических (ЭМА) технологий, обладающих рядом преимуществ в сравнении с контактными методами.

На основе результатов исследований в области проектирования ЭМА преобразователей и приборов дефектоскопии, структуроскопии и акустической тензометрии разработаны принципиально новые бесконтактные ЭМА технологии и оборудование неразрушающего контроля металлоконструкций объектов машиностроения, металлургии, нефтяной промышленности, железнодорожного транспорта, обеспечивающие повышение качества, снижение аварийности при одновременном снижении стоимости оборудования в сравнении с зарубежными аналогами [1]. Разработанные установки внесены в реестр средств измерений, защищены патентами и свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Разработанные подходы к проектированию ЭМА-преобразователей стержневых и крутильных волн (рис. 1а,б) для исследования закономерностей их распространения в линейно-протяженных объектах и взаимодействия с дефектами позволили научно обосновать требования к ЭМА технологиям волноводного контроля, реализовать их в виде акустических дефектоскопов прутков АДП, насосных штанг АДНШ и насосно-компрессорных труб АДНКТ, внедрить на предприятиях нефтяной промышленности.

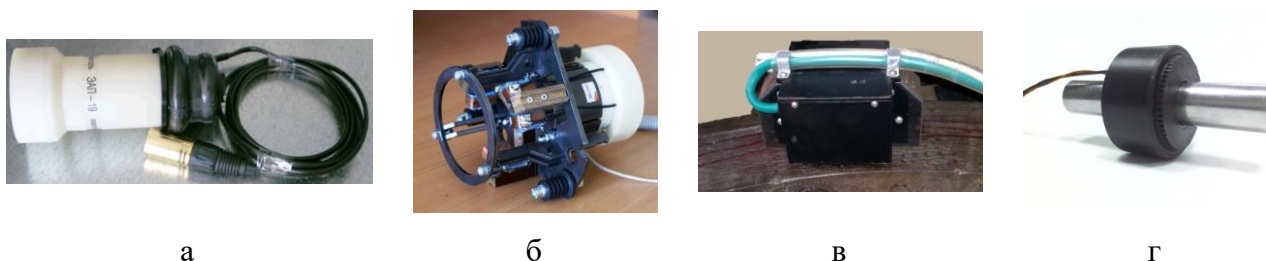


Рис. 1. ЭМАП дефектоскопа АДНШ (а), ЭМАП дефектоскопа АДНКТ (б), ЭМАП структуроскопа СЭМА (в), ЭМАП дефектоскопа ДЭМА-П (г).

За период эксплуатации дефектоскопов АДНШ и АДНКТ с 2000 по 2022 год экономический эффект за счет продления срока службы элементов глубинно-насосного оборудования составил более 20,5 млрд. рублей, в 4 раза увеличен межремонтный период работы

нефтяных скважин вследствие сокращения числа подземных ремонтов за счет исключения из эксплуатации насосных штанг, насосно-компрессорных труб с пониженным ресурсом работы (на рис. 2 – примеры выявленных дефектов).

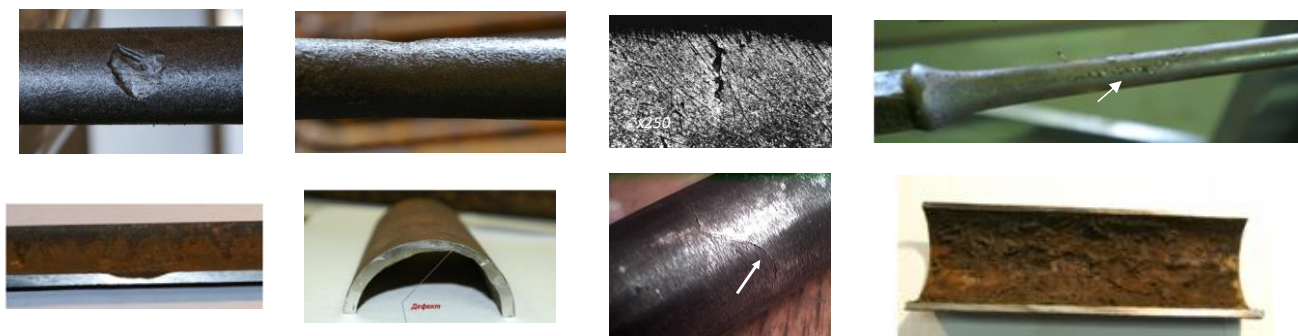


Рис. 2. Дефекты, выявляемые АДНШ: вмятина, утяжина, волосовина, после обкатки роликами продольная микротрещина; дефекты, выявляемые АДНКТ: внутренняя локальная коррозия, протир, трещина, внутренняя множественная коррозия.

Волноводные акустические дефектоскопы прутков АДП внедрены на предприятиях машиностроения для входного контроля прутков-заготовок при производстве пружин, насосных штанг, инструмента.

Разработанные подходы к проектированию ЭМАП ортогонально поляризованных поперечных волн, разработанные методики определения коэффициентов упруго-акустической связи, анализ уравнений акустоупругости в приложении к объектам в условиях линейного и плоского напряженного состояния с учетом предыстории материала, обусловленной остаточными напряжениями и анизотропией свойств, позволили научно обосновать требования к ЭМА-технологиям структуроскопии и оценки напряженно-деформированного состояния, реализованные в виде структуроскопа СЭМА, прошедшего промышленные испытания, использованного при выполнении НИОКР по оценке остаточных напряжений в вагонных колесах и бандажах колес локомотивов, натяга бандажей локомотивных колес на предприятиях железнодорожного транспорта, а также по контролю анизотропии свойств и механических характеристик трубного и листового стального проката [2].

Разработанные подходы к проектированию проходных ЭМАП продольных и поперечных волн с радиальными направлениями по диаметру прутка, исследованные закономерности распространения и фокусировки волн в объектах с неравномерностью по толщине, эллиптичностью и с дефектами; выявленные новые информативные характеристики (вероятностные, спектральные, корреляционные) позволили научно обосновать требования к технологиям ЭМА зеркально-теневого метода многократных отражений дефектоскопии и структуроскопии цилиндрических объектов, реализовать в виде дефектоскопа прутков ДЭМА-П [3], прошедшего промышленные испытания при контроле прутков-заготовок

утяжеленных насосных штанг, пружин, деталей спецтехники на предприятиях машиностроения (на рис. 3 – примеры выявленных дефектов).

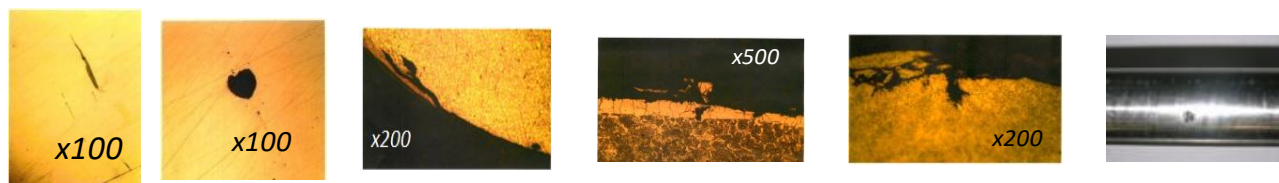


Рис. 3. Дефекты, выявляемые дефектоскопом ДЭМА-П: неметаллические включения, закаты, обезуглероженный слой, раскатанные пузыри, раковины.

В сравнении с традиционно используемыми для контроля вихретоковыми, магнитными, контактными УЗ методами, разработанные ЭМА-технологии обеспечивают выявление опасных внутренних и поверхностных дефектов с размерами, много меньшими длины волны, а также областей с высоким уровнем остаточных напряжений, влияющих на долговечность изделий.

Перечисленные разработки обеспечивают высокую производительность, снижение трудозатрат на операции контроля, повышение качества продукции и продление срока эксплуатации, объединены в единый комплекс прецизионной аппаратуры для исследований широкого спектра акустических характеристик и упругих свойств различных материалов и изделий разнообразной конфигурации [4].

#### 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 Сибирского отделения РАН, 2017. 234 с.
2. *Муравьев В.В., Муравьева О.В., Байтеряков А.В.* Структурно-чувствительные акустические параметры конструкционных сталей. Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2020. 152 с.
3. *Муравьева О.В., Муравьев В.В., Петров К.В.* Неразрушающий контроль цилиндрических изделий с использованием проходных электромагнитно-акустических преобразователей. Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2022. 220 с.
4. Уникальная научная установка «Информационно-измерительный комплекс для исследования акустических свойств материалов и изделий» (<http://ckp-rf.ru>).

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАДИЙ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛА ПО ДАННЫМ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ

© 2023 г. Татьяна Викторовна Игумнова<sup>1\*</sup>, С. А. Бехер<sup>1\*\*</sup>, М. А. Гуляев<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – *Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049*

*г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 191*

*\* - tatyna979@mail.ru; \*\* - beher@stu.ru; \*\*\* - lokigulyaev@gmail.com*

Целью работы является экспериментальное изучение связи результатов акустико-эмиссионных данных со стадиями разрушения материала. В качестве объекта испытаний использованы модели сосудов, работающих под давлением.

Акустико-эмиссионный контроль (АЭ) является перспективным методом неразрушающего контроля, позволяющим в целом осуществлять оценку состояния объекта контроля, регистрировать информативные параметры акустико-эмиссионной информации и по некоторым данным выявлять развивающиеся дефекты [1, 2]. Еще одним преимуществом метода является универсальность его применения для различных объектов контроля, различных по форме, свойствам, техническому состоянию, структуре, а также физической природе источников АЭ. Все указанные начальные условия контроля будут влиять на информативные параметры АЭ информации, поэтому для каждого объекта контроля рекомендуется проведение предварительных испытаний, а также подбор соответствующей аппаратуры [3, 4]. Преимущества АЭ контроля становятся возможными при наличии достоверных алгоритмов интерпретации данных АЭ контроля и критериев браковки изделий. Применение описанных в литературе критериев чаще затруднительно в силу сложности требуемой математической обработки массива акустико-эмиссионных данных. Актуальным является исследование связи информативных параметров сигналов АЭ на каждой стадии разрушения материала с параметрами условий контроля и нагружения, а также изучение применимости критериев браковки.

В работе обсуждаются результаты разрушающих испытаний двух сосудов под действием гидростатического давления. Испытания проводились на специализированном гидравлическом стенде на базе Сибирского государственного университета путей сообщения, высота каждого сосуда составляла 1 м, толщина стенки – 6 мм, днища сварные. Сигналы АЭ регистрировались системой цифровой акустико-эмиссионной диагностической СЦАД-16-03 с частотой дискретизации 2 МГц, зарегистрированной в Реестре средств измерений № 39729. Анализ зарегистрированной АЭ информации проводился в штатном программном обеспечении диагностической системы и с помощью математической обработки. Для объектов контроля реализованы два этапа испытаний. На первом этапе проводились циклические испытания сосудов в рабочем режиме с постоянной регистрацией АЭ информации и мониторингом напряженно-деформированного состояния. На втором этапе испытаний на стенках сосудов

реализованы модели дефектов в виде утонения стенки и проведены разрушающие испытания. На рис. 1 представлены характерные результаты акустико-эмиссионного контроля и контроля напряженно-деформированного состояния сосуда на втором этапе испытаний.

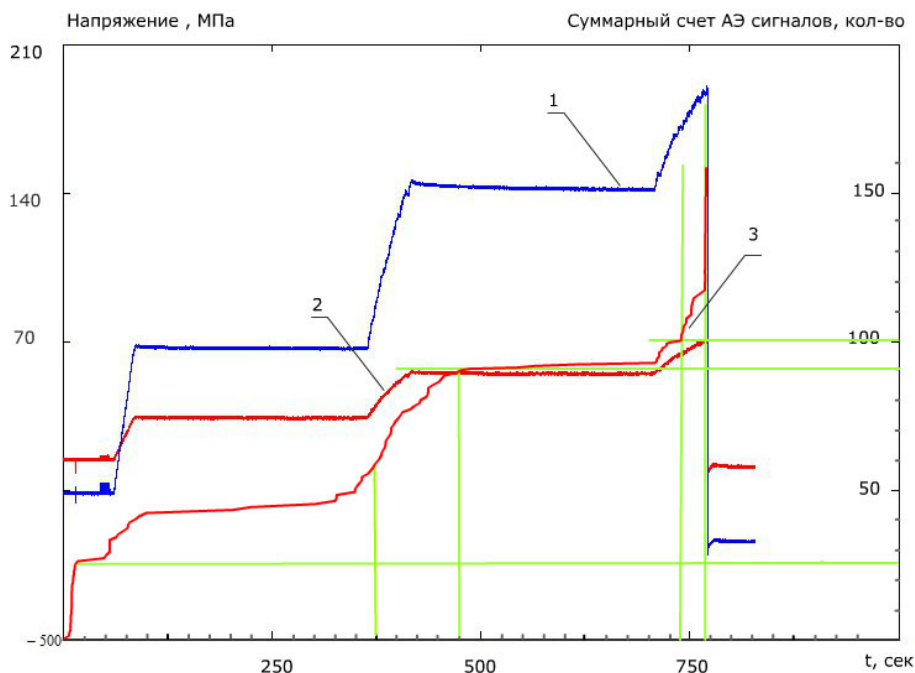


Рис. 1. Данные испытания сосуда после создания местного утонения в стенке и предварительных прочностных испытаний: (1) – горизонтальная составляющая относительных деформаций стенки сосуда; (2) – вертикальная составляющая относительных деформаций стенки сосуда; (3) – суммарный счет АЭ.

По результатам испытаний определены основные стадии работы сосудов под действием гидростатической нагрузки. Используются методы обработки цифровых изображений, анализ тензометрических и акустико-эмиссионных данных.

Для каждого этапа испытаний определены основные значения параметров акустико-эмиссионной информации, выделены информативные сигналы и предложены наиболее достоверные критерии определения состояния объекта контроля.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Буйло С.И. Физико-механические, статистические и химические аспекты акустико-эмиссионной диагностики. Ростов-на-Дону: Изд-во Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону), 2017. 184 с.
2. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Рамазанов И.С., Кузнецов А.Б., Чернова В.В. Испытания образцов из углепластика с ударными повреждениями с использованием метода акустической эмиссии и тензометрии // Контроль. Диагностика. 2022. № 7. С. 14–25.
3. Бехер С.А., Попков А.А. Временные характеристики потока сигналов акустической эмиссии при развитии трещин в стекле при ударном нагружении // Вестник ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова. 2019. № 1. С. 62–71.
4. Gerasimov S.I., Sych T.V. Finite element modelling of acoustic emission sensor // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 881. No. 1. P. 012003.

## ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА МНОГОКРАТНОЙ ТЕНИ ПРИ КОНТРОЛЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

© 2023 г. Ольга Владимировна Муравьева<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> – *Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашикова, 426069  
г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7*

<sup>2</sup> – *Удмуртский федеральный исследовательский центр РАН, 426067  
г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, д. 34*

\* - *pmkk@istu.ru*

Цилиндрические объекты занимают особое место в номенклатуре изделий металлургии, машиностроения, нефтяной, газовой промышленности, транспорта (прутки, трубы и разнообразные изделия из них). Особенностью данных объектов является трудность реализации применительно к ним традиционно используемых контактных ультразвуковых (УЗ) методов, достоверность и воспроизводимость которых зависит от качества обработки поверхностей контролируемых объектов и их диаметра (особенно в случае объектов малого диаметра). Вихретоковые и магнитоиндукционные методы, несмотря на преимущество бесконтактной работы, выявляют только поверхностные и приповерхностные дефекты. При этом получаемая информация зависит от ряда факторов (зазор, магнитные и электрические характеристики объекта), что приводит к проблемам при идентификации дефектов.

Разработанный метод многократной тени цилиндрических объектов [1] реализован с использованием проходных электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей со специальными системами подмагничивания, обеспечивающими излучение-прием поперечных (продольных) волн во всех радиальных направлениях в поперечном сечении объекта, а также накладных ЭМА-преобразователей рэлеевских волн, обеспечивающих возбуждение и прием волн в прямом и обратном направлениях по периметру прутка. Благодаря отсутствию потерь на границе преобразователь – объект контроля и меньшему расхождению волны при формировании цилиндрического фронта возможно наблюдение серии многократных отражений, насчитывающих десятки импульсов. Выработаны научно-обоснованные требования к конструированию специализированных ЭМА-преобразователей, полученные с помощью моделирования магнитных полей систем подмагничивания и полей вихревых токов высокочастотного индуктора в программной среде Comsol Multiphysics, позволившие обосновать технологические зазоры и оптимизировать количество типоразмеров преобразователей для широкого диапазона диаметров объектов. Результаты моделирования акустических полей проходного ЭМА-преобразователя (частота и диаметр) позволили оценить влияние его параметров на коэффициенты фокусировки и на распределение смещений по диаметру.



Пример наблюдаемой серии импульсов многократных переотражений поперечных (продольных) волн по диаметру прутка представлен на рис. 1а. Огибающие серии многократных отражений характеризуются увеличением ослабления для дефектных областей прутка (рис. 1б).

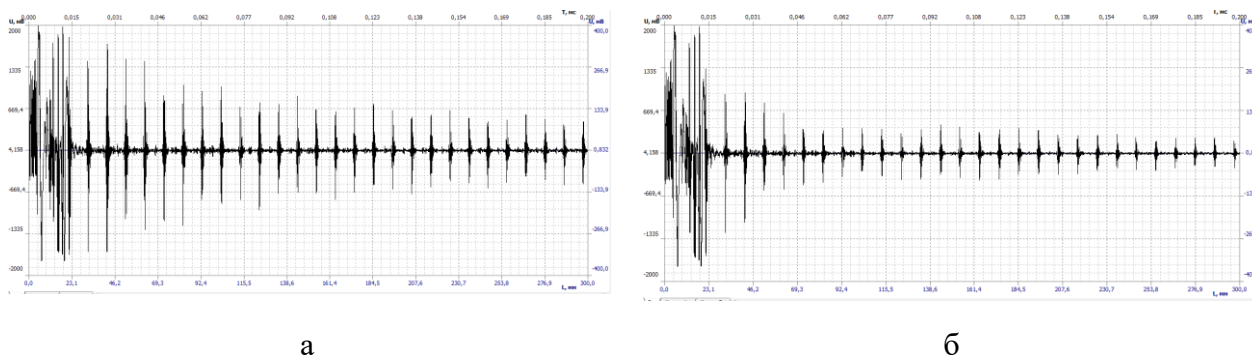


Рис. 1. Серии многократных отражений поперечной волны по диаметру прутка в бездефектной (а) и дефектной (б) областях.

Для анализа серии импульсов многократных отражений использованы методы спектрального и вероятностно-статистического анализа и обоснованы новые информативные параметры получаемых осциллограмм. В частности, показано, что вероятностные характеристики сигнала, возведенного в квадрат, являются более чувствительными и однозначными, а наиболее информативными являются статистические характеристики «математическое ожидание», «дисперсия», а также коэффициент выявляемости серии импульсов.

Метод апробирован при контроле партии прутков диаметрами от 10 до 30 мм с различным качеством обработки поверхности различных производителей (ОАО «Ижсталь», ЗАО «ЗМЗ», ЗАО «ОМЗ», ОАО «Северсталь-Метиз»). Обнаруженные дефектные участки были подвергнуты металлографическому анализу. Среди обнаруженных дефектов: неметаллические включения (оксиды, силикаты, сульфиды), дефекты поверхности (вмятины, плены, закаты, раскатанные пузыри, раскатанные трещины, раскатанные загрязнения, обезуглероженный слой), недопустимые при производстве пружин.

Метод использован при оценке упругих свойств, качества термической обработки, структурного и напряженно-деформированного состояния прутков из конструкционных низколегированных сталей перлитного класса 40Х, 15Х2ГМФ и 40ХГМ, хромоникелевой стали 03Х14Н7В и 09Х17Н5Ю-ВИ, мартенситно-старееющей стали 12ХМ, рессорно-пружинных сталей марок 60С2А и 60Г, а также пружин после навивки. Проведенные исследования показали возможность использования для структуроскопии и оценки напряженно-деформированного состояния стальных прутков следующих структурно-чувствительных параметров: абсолютные значения скоростей продольных, поперечных и рэлеевских волн, их изменение в процессе механического нагружения, соответствующие акустоупругие коэффициенты по скорости,

относительное изменение амплитуды в процессе нагружения, характеризующее эффективность ЭМА-преобразования.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что форма огибающей сигналов модулируется при эллиптичности сечения прутков, при этом наблюдается определенная периодичность в огибающей амплитуд эхоимпульсов многократных отражений, происходит смещение эхо-импульсов по времени, появляются дополнительные импульсы, опережающие или запаздывающие относительно основных переотражений. Существенно, что разработанный метод позволяет обеспечить возможность выявления отклонений диаметра с погрешностью 0,01 % при условии постоянства скорости волны.

Существенные преимущества метода многократных отражений с использованием бесконтактных ЭМА-преобразователей проходного типа:

- высокая чувствительность метода к внутренним и поверхностным дефектам;
- высокая разрешающая способность при локализации дефектов по длине объекта, отсутствие мертвой зоны;
- отстройка от качества акустического контакта, так как возбуждение волн происходит не с поверхности преобразователя, а с тонкого приповерхностного слоя по огибающей объекта, определяемого глубиной проникновения вихревых токов;
- возможность реализации УЗ контроля без иммерсионной жидкости и дополнительной подготовки поверхности с обеспечением достаточно высокой производительности контроля;
- использование в качестве дополнительных информативных параметров скорости и затухания волн, эффективности ЭМА преобразования;
- возможность использования метода для контроля прутков из различных, в том числе неферромагнитных металлов и сплавов.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252/>) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» ИжГТУ имени М.Т. Калашникова.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Муравьева О.В. Муравьев В.В., Петров К.В.* Неразрушающий контроль цилиндрических изделий с использованием проходных электромагнитно-акустических преобразователей. Ижевск: Изд-во УИР Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова, 2022. 220 с.



## ВЫЯВЛЕНИЕ ДИФфуЗИОННЫХ ПРОСЛОЕК РАЗНОРОДНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

© 2023 г. Вера Александровна Барат<sup>1\*</sup>, А. Ю. Марченков<sup>1\*\*</sup>, М. В. Карпова<sup>1</sup>,  
В. В. Бардаков<sup>1,2</sup>, С. В. Елизаров<sup>2</sup>

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

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

\* - [BaratVA@mpei.ru](mailto:BaratVA@mpei.ru); \*\* - [MarchenkovAY@mpei.ru](mailto:MarchenkovAY@mpei.ru)

Разнородное сварное соединение является сложным для диагностики объектом, так как высокий градиент химического состава и структурная неоднородность в ответ на зондирующее воздействие создает структурные шумы, что приводит к снижению чувствительности активных методов неразрушающего контроля. В то же время применение пассивного метода акустической эмиссии (АЭ) является перспективным [1], так как источником диагностических сигналов в данном случае является не отклик объекта на зондирующее излучение, а сами дефекты структуры разнородного сварного соединения, испускающие волны АЭ. Данная работа посвящена выявлению специфичных дефектов разнородных сварных соединений – кристаллизационных и диффузионных прослоек (обезуглероженных, карбидных, мартенситных), формирующихся в процессе сварки и при последующей длительной эксплуатации соединения.

В работе исследованы комбинированные сварные соединения сталей 09Г2С и 12Х18Н10Т, изготовленные аргонодуговой сваркой пластин толщиной 3 мм с использованием присадочной проволоки Sabaros SW146. Для получения в сварных соединениях диффузионных прослоек дополнительно проводилась термическая обработка. Из полученных соединений были изготовлены плоские образцы, которые испытывались на статическое и циклическое растяжение до разрушения.

На рис. 1а показаны АЭ данные, полученные при статическом растяжении бездефектного образца разнородного сварного соединения. Зависимость АЭ активности от деформации имеет два характерных экстремума: первый, в области 250–300 МПа, приблизительно соответствует пределу текучести стали 12Х18Н10Т, второй, в области 400 МПа, – пределу текучести стали 09Г2С. На рис. 1б показаны АЭ параметры, полученные при растяжении образца с диффузионными прослойками. На графике АЭ активности возникает дополнительный максимум, приблизительно соответствующий напряжению 250-300 МПа, что соответствует пределу прочности ферритной фазы.

На рис. 2а показаны АЭ данные, полученные при циклическом нагружении бездефектного образца разнородного сварного соединения при  $\sigma_{\max}=200$  МПа, близком к эксплуатационному. На рис. 2а показаны результаты испытаний бездефектного образца, на рис. 2б – для образца с диффузионными прослойками.

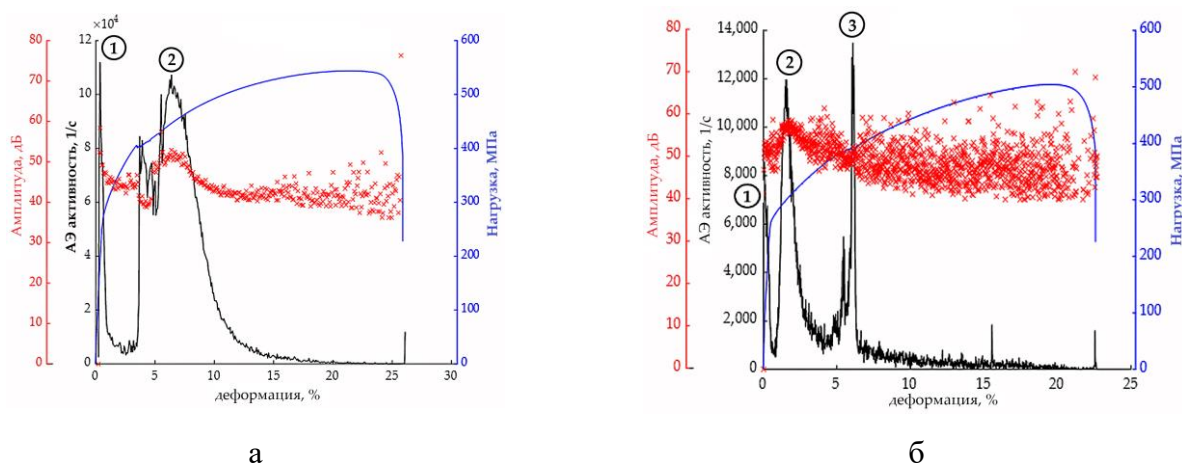


Рис. 1. АЭ данные при статическом испытании образцов, а – без дефектов, б – с прослойками.

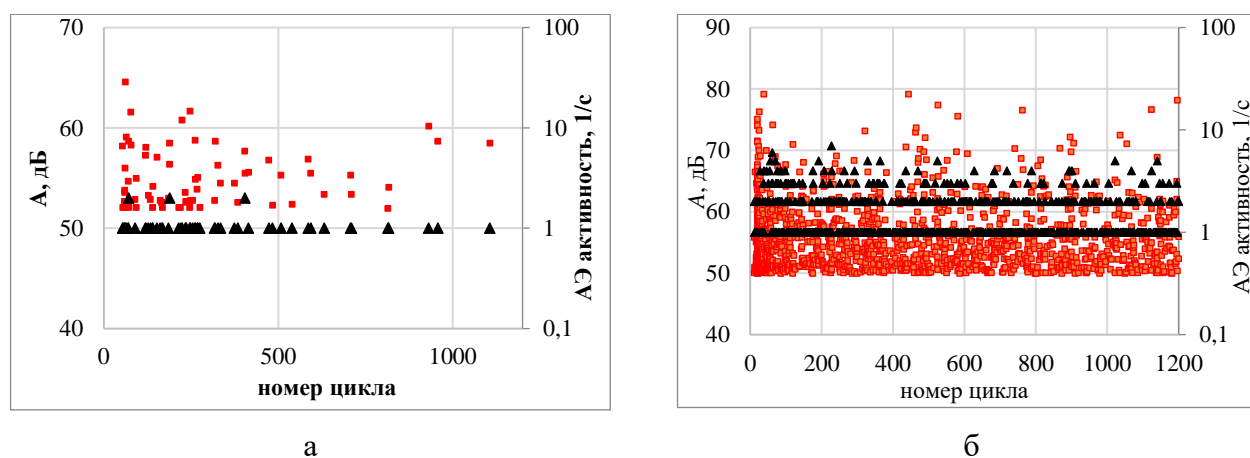


Рис. 2. АЭ данные при циклическом испытании образцов, а – без дефектов, б – с прослойками.

Для образцов с диффузионными прослойками АЭ активность оказалась в 10 раз выше, а среднее значение амплитуд – в 2 раза выше, чем для бездефектного образца. Таким образом, характер АЭ данных для бездефектного и дефектного образцов оказывается существенно различным.

В результате проведенных исследований показана возможность применения метода акустической эмиссии для обнаружения диффузионных прослоек разнородных сварных соединений перлитных и аустенитных сталей. Полученные результаты могут быть использованы для разработки диагностических критериев выявления дефектов при разработке промышленной методики неразрушающего контроля разнородных сварных соединений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда научных исследований в рамках научного проекта № 23-29-00657.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Barat V., Marchenkov A., Bardakov V., Karpova M., Zhgut D., Elizarov S. Features of Acoustic Emission in Tensile Testing of Dissimilar Welded Joints of Pearlitic and Austenitic Steels // Appl. Sci. 2021. V. 11. P. 11892.

## ПРИБОРНЫЕ РАЗРАБОТКИ ИФМ УРО РАН ДЛЯ ЛОКАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА АУСТЕНИТНЫХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СТАЛЕЙ

© 2023 г. Михаил Борисович Ригмант<sup>1\*</sup>, М. К. Корх<sup>1\*\*</sup>, А. В. Кочнев<sup>1\*\*\*</sup>

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

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

Свойства изделий из сталей аустенитного и аустенитно-ферритного класса в значительной степени зависят от структуры и фазового состава, которые могут изменяться в процессе эксплуатации изделия. При воздействии высоких или низких температур и упруго-пластическом деформировании может происходить образование фазы мартенсита деформации ( $\alpha'$ -фаза) вследствие распада аустенита ( $\gamma \rightarrow \alpha'$  превращение). Когда в материале изделий имеется сразу две ферромагнитные фазы, то возникают сложности при выборе метода фазового контроля.

Для начала авторы провели большую работу для получения трехфазных образцов аустенитных сталей. Суть ее сводится к тому, что двухфазные образцы подвергались охлаждению в жидком азоте, а затем были деформированы в валках холодной прокатки с разной степенью деформации.

После получения трехфазного материала (аустенит + феррит + мартенсит) был использован ряд традиционных и относительно новых методик структуроскопии и фазового контроля для выявления образовавшегося мартенсита деформации и оценки фазового состава исследуемого материала. Также были проведены работы по созданию приборов неразрушающего фазового контроля. В частности, был предложен прибор Ферритометр ФХ-3-ИФМ, позволяющий проводить локальным методом количественную оценку содержания ферритной фазы в аустенитных сталях в диапазоне от 1 % до 20 % (рис. 1).



Рис. 1. Ферритометр ФХ-3-ИФМ для локальных измерений процентного содержания феррита в аустенитных сталях.



Рис. 2. Прибор ИМДС для контроля содержания фазы мартенсита.

Другой прибор на рис. 2, ИМДС-1 (измеритель мартенсита деформации сталей) был разработан и применен для оценки содержания фазы мартенсита в изначально аустенитных сталях, подвергнутых деформации.

На рис. 3 представлена другая разработка ИФМ УрО РАН – прибор «ФерроКОМПАС» – для измерения малых ферромагнитных включений в аустенитных сталях, когда содержание ферромагнитных фаз менее, чем 1 %. При этом измеряется величина относительной магнитной проницаемости  $\mu$ , которая показывает, во сколько раз увеличивается магнитный поток в контролируемом материале [1].



Рис. 3. Прибор «ФерроКОМПАС» для измерения величины относительной магнитной проницаемости  $\mu$ .



Рис. 4. Прибор «МИКРООММЕТР специализированный» для измерения удельного электрического сопротивления.

На рис. 4 представлен прибор «МИКРООММЕТР специализированный» для измерения значений удельного электрического сопротивления  $\rho$ , который внедрен на нескольких крупных предприятиях страны. Устройство позволяет проводить измерения  $\rho$  в широком диапазоне сталей и сплавов неразрушающим методом [2].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ригмант М.Б. Методы и средства контроля фазового состава двух- и трехфазных аустенитных сталей // Дефектоскопия. 2018. Т. 2. С. 27–40.
2. Огнева М.С., Ригмант М.Б., Казанцева Н.В., Корх М.К., Давыдов Д.И. Связь электрических и магнитных свойств с количеством мартенсита деформации в пластически деформированных нержавеющей сталях // Дефектоскопия. 2017. Т. 9. С. 35–43.

## УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ЧЕРЕЗ УТОЛЩЕННУЮ АУСТЕНИТНУЮ НАПЛАВКУ

© 2023 г. Игорь Владимирович Михайлов<sup>1\*</sup>, А. Н. Разыграев<sup>1\*\*</sup>, Н. П. Разыграев<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – АО "НПО"ЦНИИТМАШ", 115088 г. Москва, ул. Шарикоподшипниковая, д. 4

\* - [IVMikhaylov@cniitmash.com](mailto:IVMikhaylov@cniitmash.com); \*\* - [ANRazygraev@cniitmash.com](mailto:ANRazygraev@cniitmash.com);

\*\*\* - [NPrazygraev@cniitmash.com](mailto:NPrazygraev@cniitmash.com)

Постановка задачи: исследовать влияние утолщения (на 3 - 7 мм) аустенитной наплавки на предэксплуатационный и эксплуатационный ультразвуковой контроль (УЗК) металла корпуса реактора через аустенитную антикоррозионную наплавку в сравнении с УЗК через стандартную наплавку, предусмотренную конструкторской документацией (9 - 13 мм).

Для обеспечения исследований УЗК изготовлены образцы для исследований с размерами 300х300 мм, толщина наплавки 11, 16 мм и с переходной наплавкой от 11 до 18,3 мм.

При предэксплуатационном и эксплуатационном НК металла используют УЗК продольными и поперечными волнами с применением:

- прямых преобразователей (ПЭП) продольных волн с частотой ультразвука (УЗ) 2,0 МГц,
- наклонных ПЭП поперечных волн 45° и 60° с частотой УЗ 2,0 МГц,
- наклонных ПЭП продольных волн 70° с частотой УЗ 2,0 МГц, 45° с частотой УЗ 4,0 МГц.

Выполнены исследования акустических полей преобразователей поперечных и продольных волн при УЗК через наплавку и выявляемости дефектов при прохождении ультразвука через наплавки разной толщины и наплавку с наклонной по отношению к наружной (контактной для УЗК) поверхности зоной перехода (сплавления) от наплавки толщиной 11 мм к наплавке толщиной 18 мм.

Для обеспечения проведения вышеуказанных исследований и получения объективных результатов были спроектированы и изготовлены специализированные образцы для исследований (ОИ). В исследованиях также использовали ОИ из стали 20 для сравнительных испытаний прохождения ультразвука через моно и биметалл.

Исследование акустических полей и диаграммы направленности (ДН) при УЗК через антикоррозионную аустенитную наплавку толщиной 11, 16 и 18,3 мм проводили зеркально-теневым методом (рис. 1) на образцах с общей толщиной 90 мм, в том числе на образце из перлитной стали без наплавки. Исследование на однородном металле считали эталонным акустическим полем и ДН. Оно позволяло оценить и зафиксировать влияние толщины, структуры металла наплавки, зоны сплавления наплавки (глубины её залегания и непараллельности зоны сплавления контактной поверхности) с основным металлом и направления хода наплавочной ленты.

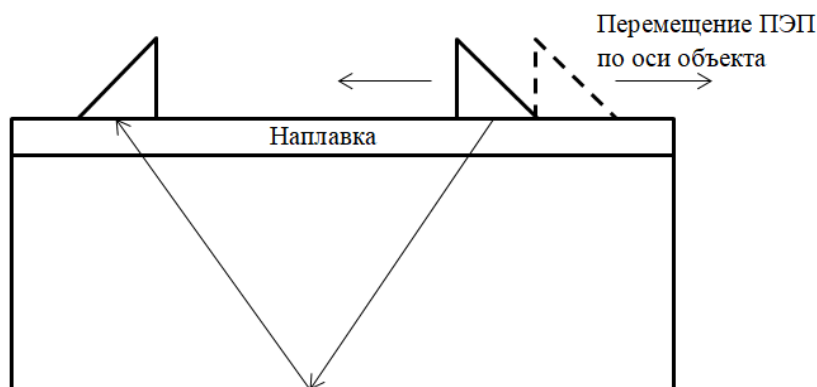


Рис. 1. Схема прозвучивания для наплавки толщиной 11, 16, 18,3 мм.

Были исследованы распределения полей излучения-приема поперечных и продольных волн преобразователей WB-45-2 и ПЦП-45-1,8 (рис. 2) на образцах с тремя наплавками с толщиной 11, 16 и 18,3 мм, а также на однородном перлитном металле. Полученные распределения характеризуют акустические поля преобразователей и позволяют при их сравнении оценить степень влияния толщины на структуру акустического поля, в том числе при различных направлениях хода наплавочной ленты: при прозвучивании наплавки вдоль хода ленты и при перпендикулярном прозвучивании.

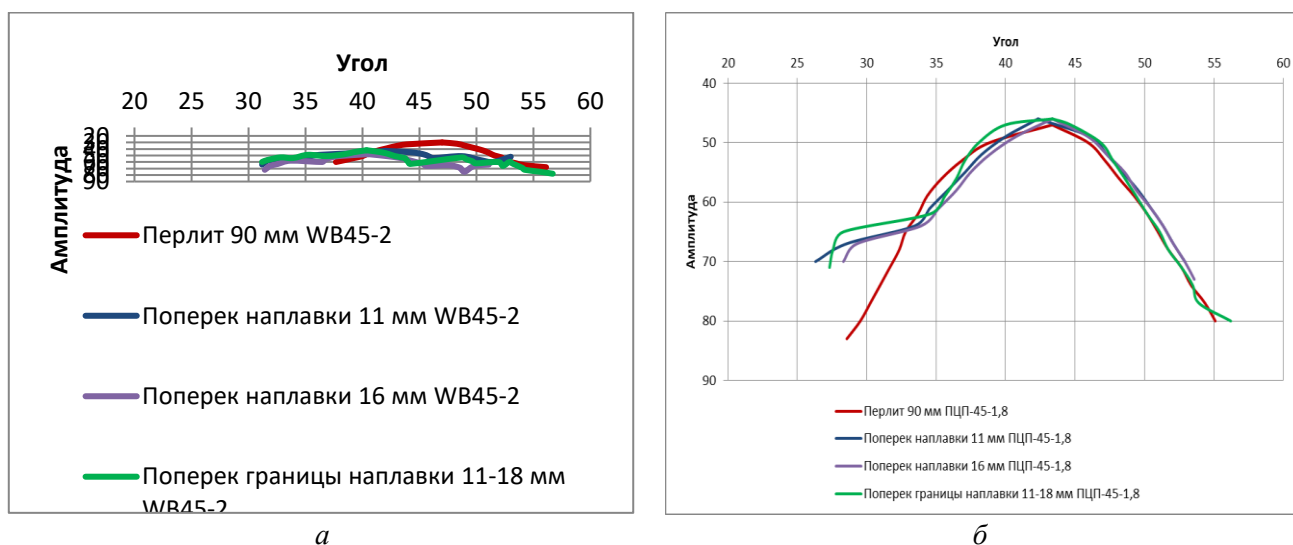


Рис. 2. Поле излучения–приема  
*а* – поперечной волны WB-45-2 на перлитном ОИ и при УЗК через наплавку (поперек) толщиной 11 и 16 мм, и на наклонной границе сплавления 11-18 мм;  
*б* – продольной волны ПЦП-45-1,8 на перлитном ОИ при УЗК через наплавку (поперек) толщиной 11 и 16 мм и на наклонной границе сплавления 11-18 мм.

Также получены данные по исследованию неопределенностей (отклонений) при определении глубины и координат дефектов при УЗК через наплавку, когда неизвестно действительное значение угла ввода луча с максимальной амплитудой в сравнении с контролем однородного перлитного металла.

Отдельное исследование проведено на участках, где линия сплавления наплавки не параллельна контактной поверхности. Здесь также исследовали амплитудные значения эхо-сигналов и координаты отражателей по глубине и расстояние до эпицентра. Исследования базировались на параметрах донного сигнала от прямого двугранного угла и сигнала от плоскодонного отражателя на известной глубине.

Результаты исследований:

1. УЗК с помощью наклонных преобразователей продольных показал существенно меньшие изменения акустических полей у ПЭП продольных волн в металле корпуса реактора в сравнении с ПЭП поперечных волн. Такие изменения параметров УЗК в соответствии с законами акустики влекут за собой меньшие значения неопределенности при определении координат дефектов/отражателей и величин амплитуд эхо-сигналов от них, по которым определяется эквивалентная площадь дефекта.
2. При УЗК наклонными ПЭП поперечными волнами через аустенитную наплавку и определении эквивалентной площади с помощью АРД-диаграмм неопределенность может составлять величины, значительно превышающие погрешность определения эквивалентной площади при УЗК основного металла и сварных соединений.
3. При УЗК наклонными ПЭП продольными волнами через аустенитную наплавку и определении эквивалентной площади с помощью АРД-диаграмм неопределенность имеет величины в пределах погрешности определения эквивалентной площади при УЗК основного металла и сварных соединений.
4. При УЗК наклонными ПЭП продольными и поперечными волнами через аустенитную наплавку и определении координат плоскодонных отражателей неопределенность (погрешность) при измерении глубины и расстояния до эпицентра имеет величины в пределах погрешностей, установленных для УЗК основного металла и сварных соединений.

В связи с полученными результатами при контроле металла с утолщенной антикоррозионной наплавкой рекомендовано применять операцию УЗК наклонными раздельно-совмещенными преобразователями продольных волн с дополнительной настройкой чувствительности на образце с реальной толщиной аустенитной наплавки на контролируемом участке.

## КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ СИЛОВОЙ РАМЫ ПРЕССА МЕТОДАМИ ТЕНЗОМЕТРИИ

© 2023 г. Сергей Алексеевич Бехер<sup>1\*</sup>, С. П. Шляхтенков<sup>1\*\*</sup>, В. В. Выплавень<sup>1\*\*\*</sup>,  
М. А. Гуляев, А. А. Попков

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

\* - behers@mail.ru; \*\* - pokl2013218@yandex.ru; \*\*\* - vladimir97927@gmail.com

Резьбовые соединения являются одними из самых распространенных источников отказов машиностроительных конструкций. Их доля в общем количестве отказов достигает 50 % [1]. Работоспособность соединений этого типа зависит от уровня и распределения упругих механических напряжений в стержне болта, шпильки [2]. Их измерение стандартными методами невозможно, а применение косвенных методов требует разработки специальных способов обеспечения необходимой достоверности и точности результатов измерений. В этих условиях оценка качества резьбовых соединений высоконагруженных крупногабаритных конструкций, в том числе в реальном режиме времени, является сложной научно-технической задачей.

Цель работы – способ тензометрического контроля высоконагруженных резьбовых соединений силовой рамы пресса гидравлического с усилием прессования 10 тыс. т.

Исследование проводилось с использованием тензометрического комплекса «Динамика-3» (СГУПС, г. Новосибирск, зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений №66938-17). В режиме измерений напряжений цена наименьшего разряда составила 0,14 МПа, погрешность, обусловленная собственными шумами аппаратуры, не превышала 0,5 МПа, частота дискретизации – 8 кГц. Тензодатчики типа 2ФПК-10-200-А-12-С наклеивались на колонны (1 - 8) и стойки (9 - 12) пресса (см. рис. 1а) с помощью цианоакрилатного клея. Погрешность, связанная с наклейкой тензодатчиков, оценивалась с помощью дублирующих тензодатчиков и не превышала 5 %. Измерение напряжений проводилось в рабочем цикле и при испытаниях с демонтированными прессформами.

В рабочем цикле обнаружен изгиб силовой рамы пресса и гистерезис деформаций, связанные с эксцентриситетом рабочего усилия и его изменением при пластической деформации заготовки. В рабочем цикле относительная разница напряжений задних элементов стоек на 110 % выше среднего значения, а передних – на 70 % ниже. Изгиб стоек вызывает изгиб колонн в нижней части: напряжения задних колонн на 30 % выше среднего значения, а передних – на 30 % ниже. Все напряжения не превышают 50 МПа, что существенно ниже (менее 20 %) предела усталостной прочности стали 20. Источник такого сложного распределения напряжений в силовой раме обоснован с использованием конечно-элементного моделирования. Показано, что эксцентриситет рабочего усилия вызывает боковые силы от плунжера, изгибающие стойки и колонны пресса.



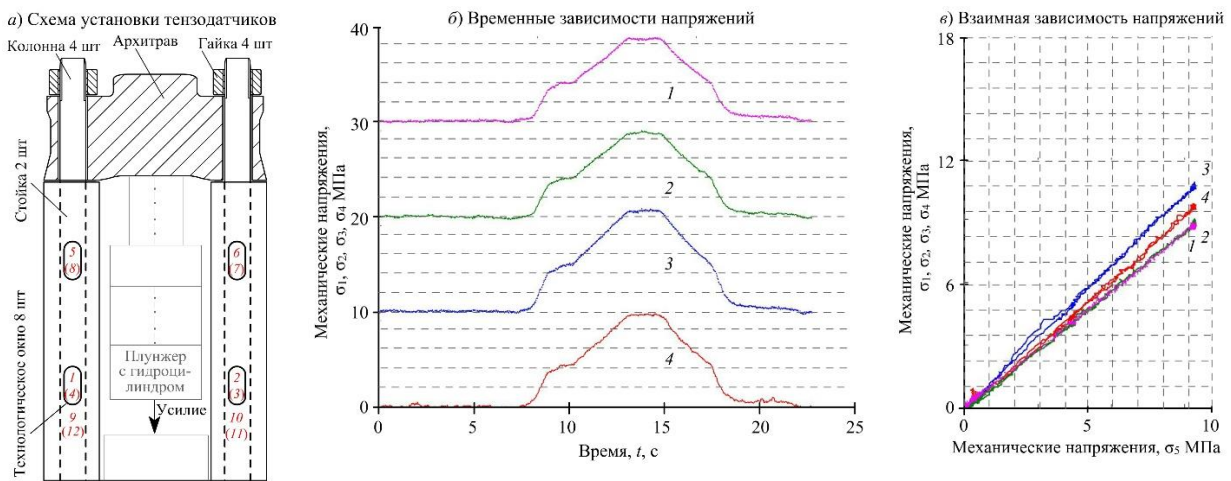


Рис. 1. Результаты тензометрии элементов пресса: *a* – схема установки тензодатчиков на колонны (1-8) и стойки (9-12); *б* – зависимость механических напряжений тензодатчиков (1-4) от времени; *в* – взаимная зависимость напряжений на тензодатчиках.

Для оценки степени затяжки гаек опор и подвижности соединений предложены критерии: относительная разница напряжений в верхней части опор при испытаниях с демонтированными прессформами не превышает погрешности измерения 5 % (рис. 1б); при увеличении нагрузки механические напряжения на опорах возрастают одновременно: отсутствует задержка между началом роста напряжений на разных тензодатчиках, которая не превышает цены наименьшего разряда тензосистемы 0,15 МПа (рис. 1б); напряжения в верхней части всех опор при испытаниях прямо пропорциональны друг другу с коэффициентом корреляции 0,999 и выше (рис. 1в); средние напряжения на стойках 19 МПа соответствуют средним напряжениям на колоннах 20 МПа с учетом погрешности метода измерений (5 %), что указывает на достаточный уровень затяжки и отсутствие подвижности соединений в рабочем цикле. Для контроля правильности функционирования пресса рекомендован измерительный контроль зазоров скользящих плунжера.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рапацкий Ю.Л., Копп В.Я. Исследование механосборочного производства с применением методов экспертных оценок и анализа // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. 2020. № 2(10). С. 51–67. EDN PLCCMB.
2. Сотников А.Л., Щербина С.В. Сборка крупногабаритных резьбовых соединений методом приложения осевых сил // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. 2017. № 5(48). С. 167–174. EDN ZWJPNF.

## ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ УСЛОВИЙ НА ПАРАМЕТРЫ И КАЧЕСТВО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ РЕЛЬСОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

© 2023 г. Алексей Леонидович Бобров<sup>1\*</sup>, К. И. Гончаров<sup>1, 2\*\*</sup>

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

<sup>2</sup> – Региональный центр диагностики и мониторинга – Единый центр расшифровки, 630003  
г. Новосибирск, ул. Владимирская, д. 2а, корп. 2  
\* - beaver@stu.ru; \*\* - kirya.pochta@gmail.com

Наиболее развитыми и применяемыми для безопасной эксплуатации железнодорожного пути являются система, аппаратура и методики ультразвукового контроля [1]. Эта система позволяет обеспечить круглогодичный периодический контроль рельсов и своевременное выявление развивающихся трещин и других дефектов эксплуатационного происхождения. На качество контроля влияет достаточно много факторов, связанных с чувствительностью применяемых способов к надежности акустического контакта, по этой тематике регулярно проводятся исследования [2]. Однако известно [3], что и условия контроля, такие как угол ввода, температура и другие основные параметры контроля, могут существенно влиять на получаемые результаты и приводить к снижению достоверности контроля в целом. Именно этой проблеме влияния внешних факторов и основных настраиваемых параметров контроля посвящены предлагаемые в данной работе результаты исследований, которые были начаты в работе [4].

Ключевым параметром ультразвукового контроля, который обеспечивает выявление дефектов заданных размеров, является чувствительность. На первом этапе исследований анализировали изменение условной чувствительности в зависимости от температуры для преобразователей.

Как показали результаты и теоретических расчетов, и экспериментальных данных, увеличение температуры приводит к увеличению угла ввода, однако в совокупности с изменением направления диаграммы направленности это дает эффект, приводящий к слабому изменению абсолютной чувствительности тракта при низких температурах (ниже нормальной) и достаточно резкому падению чувствительности при температурах выше 25 °С. Снижение абсолютной чувствительности, измеренное по боковым цилиндрическим отражателям на образцах типа СО-2 и СО-3Р в среднем составляет около 12 дБ для всех типов преобразователей на интервале температур 25...65 °С.

Анализ относительной чувствительности оценивали на образцах с угловыми отражателями, имитирующими наиболее распространенный тип формирующихся в эксплуатируемых рельсах дефектов – вертикальные усталостные трещины в теле рельса. Относительная чувствительность изменяется в пределах погрешности определения амплитуды сигналов от уголкового отражателя  $\pm 2$  дБ.

Опыты определения измеряемых характеристик реальных дефектов типа усталостных трещин показали, что чувствительность к ним может существенно изменяться с изменением температуры и угла ввода, последний параметр может изменяться как вследствие колебаний температуры, так и в связи с другими факторами. Такое неоднозначное поведение относительной амплитуды сигналов от усталостных трещин связано с тем, что реальные усталостные трещины имеют более диффузную поверхность и наклон  $9...37^\circ$  относительно нормали, что известно из исследований [5].

Кроме того, отмечено, что температурные колебания и изменения угла ввода сильнее оказывают влияние и на абсолютные, и на относительные изменения чувствительности к дефектам рельсов для преобразователей с большими углами ввода, например,  $55^\circ$ ,  $58^\circ$ ,  $70^\circ$ .

Таким образом, описанными факторами формируется неопределенность чувствительности каналов контроля рельсов, которая требует более внимательного подхода к анализу выявляемости различных дефектов в рельсах, находящихся в условиях эксплуатации. Эту задачу можно решить программно, когда при расшифровке результатов контроля, представленных в виде В-развертки можно реализовать наложение данных на результаты предыдущего контроля. Такая задача возможна только при создании универсального программного обеспечения, способного представлять результаты контроля в единой программе расшифровки. В свою очередь, железной дороге необходимо предусмотреть при заключении контрактов на приобретение дефектоскопического оборудования приобретение прав на данные и их конвертацию в единое программное обеспечение.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Марков А.А., Максимова Е.А. Анализ эффективности ультразвуковых и магнитных каналов дефектоскопических комплексов при контроле рельсов // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2019. Т. 22. № 2. С. 22–32.
2. Bayev A.R., Mayorov A.L., Levkovich N.V., Shavlovskiy D.V., Asadchaya M.V. Influence of Geometry and Boundary Conditions in Area of Cohesion between Materials on the Reflection of an Ultrasonic Beam. Part 1. Theoretical Research // Devices and Methods of Measurements. 2021. V. 12. № 2. P. 124–132.
3. Волкова Л.В., Платунов А.В. Использование многократного зеркально-теневого метода при ультразвуковом контроле пера подошвы рельса // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2019. Т. 22. № 4. С. 38–45.
4. Бобров А.Л. Анализ проблем процедур при сертификации персонала по ультразвуковому методу контроля // Сборник тезисов XXIV Петербургской науч.-техн. конф. «Инновационные средства и технологии ультразвукового контроля и диагностики», Санкт-Петербург, 24-27 мая, 2022. С. 112–113.
5. Шур Е.А., Борц А.Е., Сухов А.В. и др. Эволюция повреждаемости рельсов дефектами контактной усталости // Вестник ВНИИЖТ. 2015. № 3. С. 3–9.

# ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПАЙКИ БОКОВЫХ СТенок МЕДНЫХ ТОКОВЕДУЩИХ СОЕДИНЕНИЙ ОБМОТОК СТАТОРОВ ГИДРО- И ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

© 2023 г. Алексей Николаевич Сташков<sup>1\*</sup>, Л. Х. Коган<sup>1\*\*</sup>, А. П. Ничипурук<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> – *Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, 620108 г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, д. 18*  
\* - *stashkov@imp.uran.ru*; \*\* - *lhkogan@el.ru*

Задача контроля качества пайки токоведущих соединений обмоток статоров гидро- и турбогенераторов решается в ИФМ УрО РАН, начиная с начала 2000-х годов. На сегодняшний день разработаны методика и ряд вихретоковых дефектоскопов паяных соединений серии ДПС [1]. На рис. 1а представлен внешний вид дефектоскопа ДПС-8. Принцип работы дефектоскопов основан на определении интенсивности вихревых токов, возбуждаемых в контролируемом паяном соединении. Приборы внедрены на ряде российских энергомашиностроительных заводах и гидроэлектрических станциях. Дефектоскопы показывают степень заполнения припоем (в процентах) промежутков между частями медного токоведущего соединения.

В современных гидро- и турбогенераторах применяется соединение элементов токопроводящей шины («стержней») с использованием хомута или соединительных планок, так как изготовление такого типа соединений обмоток статоров технологически гораздо проще и дешевле. Для контроля качества пайки боковых стенок токоведущих соединений в местах контакта токоведущей шины с хомутом или планкой был разработан специализированный трансформаторный вихретоковый преобразователь с прямоугольными вырезами в полюсах П-образного сердечника (рис. 1б). Его конструкция позволяет размещать контролируемые паяные соединения в этих вырезах перпендикулярно полюсам сердечника, тем самым контур вихревых токов проходит через боковые стенки, что позволяет контролировать качество их пайки [2].

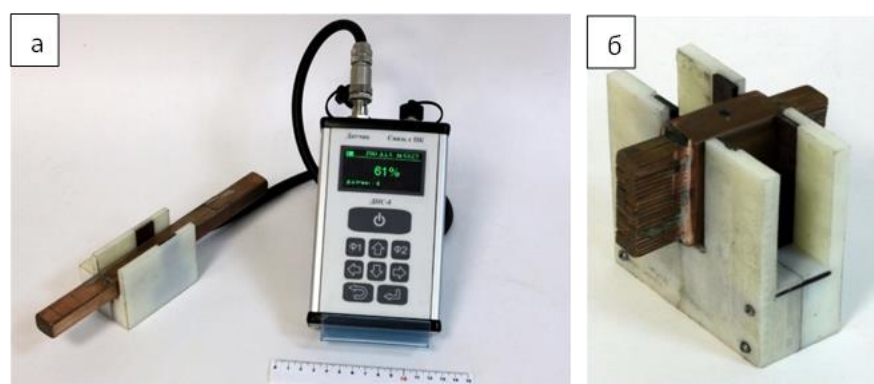


Рис. 1. Внешний вид дефектоскопа ДПС-8 (а) и специализированного вихретокового преобразователя (б) с прямоугольными вырезами в полюсах П-образного сердечника.

Площадь боковых стенок токоведущих соединений, подлежащих пайке, мала по сравнению с площадью поперечного сечения таких соединений, поэтому чувствительность аппаратуры контроля качества пайки должна быть достаточно высокой, вследствие чего возникает необходимость учитывать влияние возможных изменений внешнего сечения соединений на результаты контроля. Разработана методика, позволяющая учесть влияние технологических разбросов размеров хомутов в токоведущих соединениях на результаты контроля. Преимуществом методики является независимость результата контроля от изменения сечения контролируемого соединения в результате его изготовления из-за технологии пайки. С целью предварительной настройки аппаратуры перед проведением контроля подготавливают три образца: два сплошных медных образца прямоугольной формы, имитирующих соединения с пропаянностью боковой стенки 100 % и имеющих номинальную по техническим условиям высоту и длину, но разную толщину; третий образец, имитирующий соединение с пропаянностью стенки 0 % и имеющий минимальную толщину. Детектирование амплитуды сигнала измерительной катушки вихретокового преобразователя трансформаторного типа с П-образным сердечником проводят на двух частотах – основной (несколько десятков герц) и повышенной (выбирается от 1 до 2 кГц). На первом этапе находят разность показаний дефектоскопа между образцом с минимально возможной толщиной и подлежащим контролю соединением на повышенной частоте. На втором этапе проводят измерение на контролируемом соединении на основной частоте и вычисляют конечный результат, соответствующий пропаянности соединения с учетом его внешних геометрических размеров, используя заранее установленный на этапе настройки коэффициент пересчета [3].

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

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коган Л.Х., Ничипурук А.П., Розенфельд Е.В., Худяков Б.А. Вихретоковый контроль качества пайки соединений токоведущих соединений электрических машин. II. Эксперимент // Дефектоскопия. 2010. № 4. С. 72–82.
2. 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.
3. 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.

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИНДИВИДУАЛЬНОГО ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КОРОС-333

© 2023 г. Ринат Мансурович Абашев<sup>1,2\*</sup>, В. С. Красноперов<sup>3\*\*</sup>, И. И. Мильман<sup>1,2\*\*\*</sup>,  
Е. В. Моисейкин<sup>2\*\*\*\*</sup>, А. И. Сурдо<sup>1,2\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – *Институт физики металлов УрО РАН, 620077 г. Екатеринбург,  
ул. Софьи Ковалевской, д. 18*

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

<sup>3</sup> – *АО «Уральский электромеханический завод», 620000 г. Екатеринбург, ул. Студенческая, д. 9  
\* - abashevrm@imp.uran.ru; \*\* - krasnoperov@uemz.ru; \*\*\* - milman@imp.uran.ru;  
\*\*\*\* - e.v.moiseykin@urfu.ru; \*\*\*\*\* - surdo@imp.uran.ru*

Цель работы – научно-техническое обоснование и формирование задела с целью создания новых для атомной отрасли информационно-измерительных комплексов контроля индивидуальных доз ионизирующих излучений на основе эффекта оптически стимулированной люминесценции (ОСЛ).

Совместно с АО «Уральский электромеханический завод», являющимся предприятием ГК «Росатом», закончено создание нового наукоемкого и высокотехнологичного продукта – автоматизированной системы индивидуального дозиметрического контроля (АСИДК) КОРОС-333 с комплектом дозиметров для измерения индивидуальных эквивалентов доз (ИЭД) облучения всего тела Нр(10), хрусталика глаза Нр(3) и кожных покровов Нр(0,07). Для считывания дозиметрической информации в КОРОС-333 впервые в России использован эффект оптически стимулированной люминесценции, что позволяет в 5 - 10 раз увеличить скорость считывания, снизить в несколько раз энергопотребление и материалоемкость.

Значительная часть усилий была направлена на создание и усовершенствование аппаратной части ОСЛ-системы, конструкции дозиметров трех типов для измерения ИЭД Нр(10), Нр(3) и Нр(0,07), а также алгоритмов обработки получаемых данных. У всех используемых в АСИДК КОРОС-333 дозиметров исследованы энергетические и дозовые характеристики, которые показали полное соответствие действующим Российским и зарубежным нормам радиационной безопасности АСИДК КОРОС-333 [1].

В течение 2020 - 2022 гг. при непосредственном участии авторов система КОРОС-333 с комплектом дозиметров проходила государственные испытания во ВНИИМ имени Д.И. Менделеева. В мае 2022 г. все испытания системы были успешно завершены, а в ноябре 2022 г. получен сертификат о внесении в государственный реестр средств измерений. Как показали первые реальные демонстрации возможностей системы КОРОС-333 специалистам, она будет востребована на предприятиях ГК «Росатом», при радиационном контроле, в подразделениях МЧС, в медицинских учреждениях, в нефте- и газодобывающей отрасли.

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

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сурдо 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. № 8. С. 70–77.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ КОРРОЗИОННОГО МОНИТОРИНГА БЕЗ СНЯТИЯ ЛЕНТОЧНОГО ПОКРЫТИЯ С ТРУБОПРОВОДОВ

© 2023 г. Анастасия Витальевна Катташева<sup>1\*</sup>, И. А. Ридель<sup>1\*\*</sup>, Д. С. Кирпиченко<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – ООО «Газпром добыча Ноябрьск», 629806 ЯНАО, г. Ноябрьск,  
ул. Республики, д. 20

\* - [kattasheva.av@noyabrsk-dobycha.gazprom.ru](mailto:kattasheva.av@noyabrsk-dobycha.gazprom.ru); \*\* - [ridel@noyabrsk-dobycha.gazprom.ru](mailto:ridel@noyabrsk-dobycha.gazprom.ru);

\*\*\* - [kirpichenko.ds@noyabrsk-dobycha.gazprom.ru](mailto:kirpichenko.ds@noyabrsk-dobycha.gazprom.ru)

Ввиду того, что газовая промышленность на сегодня – одна из металлоёмких отраслей, одной из серьёзнейших проблем эксплуатации газопромысловых и газотранспортных объектов является опасность разрушения и потери герметичности газовой инфраструктуры из-за коррозионных разрушений, которые оказывают значительное влияние на поддержание работоспособности объектов отрасли.

Современный этап разработки новых газовых и газоконденсатных месторождений в России отличается осложнением дальнейшей эксплуатации трубопроводов сбора газа и газопромыслового оборудования ввиду присутствия в добываемой среде коррозионно – агрессивных компонентов, таких как диоксид углерода (CO<sub>2</sub>) (Бованенковское, Уренгойское, Чайнинское, Ковыктинское месторождения) и сероводород (H<sub>2</sub>S) (Астраханское и Оренбургское месторождения). Наличие капельной влаги или пластовой воды инициирует протекание углекислотной и сероводородной коррозии, процессы которой усугубляют минерализация и скопление водной фазы, скорости потока, повышенные температуры в технологическом оборудовании и в трубопроводах.

В настоящее время на объектах ПАО «Газпром» внедряются системы коррозионного мониторинга, представляющие из себя пару из гравиметрического датчика, основанного на измерении скорости коррозии и Eг – датчика, основанного на измерении электрического сопротивления погруженного образца в среду по отношению к контрольному элементу. Также распространено проведение выборочной ультразвуковой толщинометрии основного металла трубопроводов и оборудования.

В процессе планирования работ по коррозионному мониторингу подземных трубопроводов специалисты ООО «Газпром добыча Ноябрьск» столкнулись с ограничением проведения сплошной ультразвуковой толщинометрии ввиду необходимости снятия ленточного изоляционного покрытия для проведения контроля.

Цель проведённой работы заключалась в разработке методики проведения сплошного сканирования основного металла подземных газопроводов без необходимости снятия ленточного изоляционного покрытия для определения коррозионных повреждений.

Для реализации данной задачи предлагается использовать систему ультразвукового контроля с роликовым фазированным датчиком с матрицей на 64 элемента (рис. 1) [1-3].





Рис. 1. Роликовый фазированный датчик с матрицей на 64 элемента.

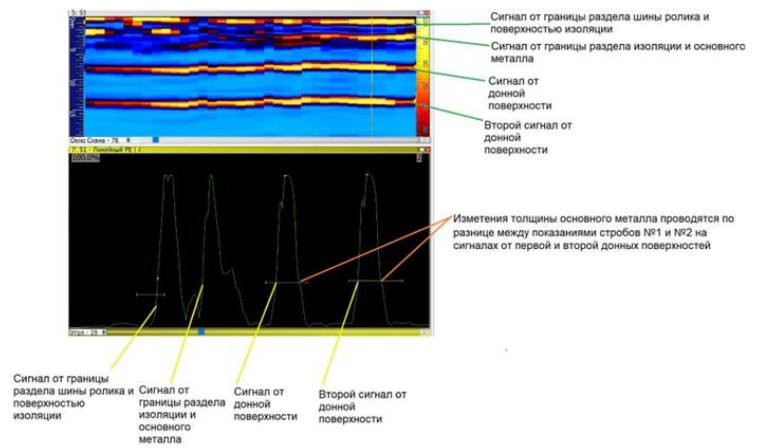


Рис. 2. Роликовый фазированный датчик с матрицей на 64 элемента.

В процессе работы определены требования к оборудованию, к квалификации специалистов, особенности методики настройки чувствительности (рис. 2) и корректировки показаний измерения глубины выявленных дефектов, а также ограничения применения данного подхода.

Применение нового высокопроизводительного подхода к контролю основного металла трубопроводов без снятия защитного покрытия в случаях, когда отсутствуют определённые ограничения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Клюев В.В. Неразрушающий контроль. Том 3. Ультразвуковой контроль. Москва: Изд-во Машиностроение, 2004. Т. 3. 864 с.
2. Пасси Г. УЗК с использованием преобразователей на фазированных решётках – способы сканирования, требования к аппаратуре и примеры практического применения // В мире НК. 2011. № 2 (52). С. 51–54.
3. СТО Газпром 9.3-011-2011. Ингибиторная защита от коррозии промышленных объектов и трубопроводов. Основные требования. 2010.

## НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ

© 2023 г. Юрий Леонидович Гобов<sup>1\*</sup>

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

\* - go@imp.uran.ru

Наличие устойчивых связей между магнитными и механическими свойствами ферромагнитных материалов является основой магнитного структурного анализа. Одним из основных методов магнитного структурного анализа является контроль по коэрцитивной силе  $H_c$ , поскольку этот параметр показывает высокую чувствительность к характеристикам материала: структуре, фазовому составу, внутренним напряжениям. Основные методы измерения  $H_c$  сводятся к использованию приставных электромагнитов. Наиболее часто используется приставной П-образный электромагнит, который намагничивает область между полюсами вдоль поверхности исследуемого изделия (рис. 1), а датчик для фиксации магнитного потока в изделии устанавливается в перемычке ярма электромагнита (3 на рис. 1). Область между полюсами электромагнита намагничивается до насыщения, а затем перемагничивается до точки, в которой магнитный поток в приставном электромагните становится равным нулю.

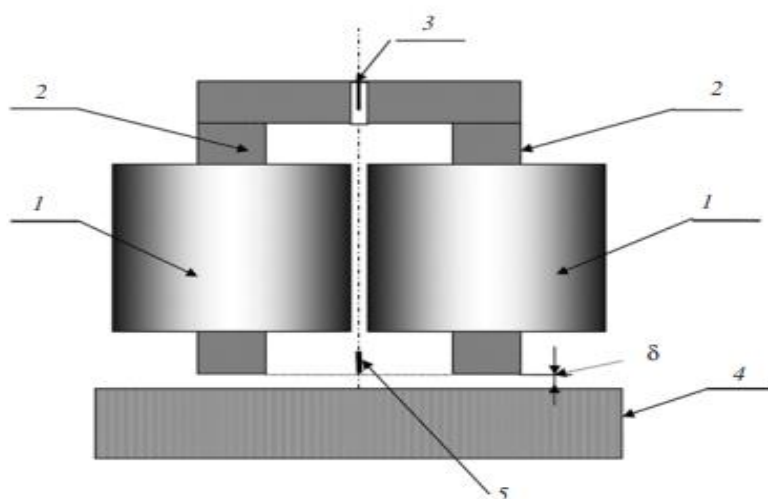


Рис. 1. Схематическое изображение приставного электромагнита с изделием и зазором между ними: 1 – катушка электромагнита; 2 – сердечники ярма; 3 – датчик Холла; 4 – испытуемое изделие; 5 – датчик Холла;  $\delta$  – зазор.

При таком методе результаты измерения коэрцитивной силы существенно зависят от геометрических размеров измеряемого образца и величины зазора между образцом и полюсами электромагнита.

Существенно улучшить качество измерения  $H_c$  возможно, если датчик магнитного поля поместить между полюсами электромагнита (5 на рис. 1) и измерять тангенциальную составляющую на поверхности изделия. Для измерения коэрцитивной силы по намагниченности  $H_{cm}$  необходимо построить калибровочную кривую показаний датчика между полюсами электромагнита от тока в катушках электромагнита  $H(J)$  при условии, что под полюсами

находится только воздух, а изделия из ферромагнетиков отсутствуют (прямая, выходящая из нуля, на рис. 2). При измерении ферромагнитного изделия пересечение с калибровочной прямой будет точкой коэрцитивной силы [1, 2].

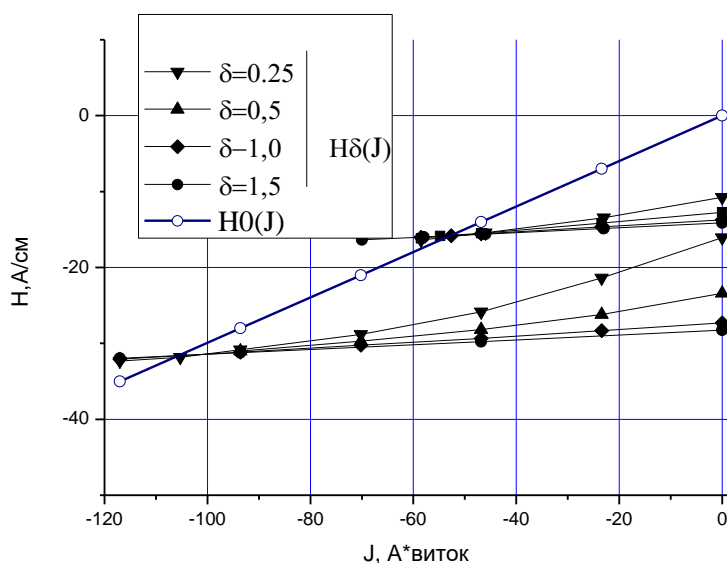


Рис. 2. Измерение коэрцитивной силы по намагниченности  $H_{см}$  при изменении зазора.

При таком методе измерение коэрцитивной силы не зависит от размеров изделия и существенно уменьшается влияние зазора между электромагнитом и изделием (рис. 2). Кроме того, из рис. 2 видно, что при зазоре более 1 мм коэрцитивную силу можно измерять при токе, равном нулю, и не доводить до пересечения с калибровочной кривой. В таком случае для измерения могут быть использованы не электромагниты, а постоянные магниты. Для измерения достаточно намагнитить локальный участок до насыщения и удалить намагничивающее устройство. При таком методе открываются новые возможности для контроля по коэрцитивной силе при движении по длинномерному изделию, например, по трубопроводу, рельсу или стальному канату.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ничипурук А.П., Бида Г.В., Царькова Т.П., Гобов Ю.Л., Сташков А.Н., Поволоцкая А.М. О снижении влияния зазора на результаты коэрцитиметрии при учете свойств приставного преобразователя // Дефектоскопия. 2010. № 8. С. 45–53.
2. Гобов Ю.Л., Жаков С.В., Михайлов А.В., Реутов Ю.Я. Бесконтактный метод коэрцитиметрии при намагничивании П-образным электромагнитом // Дефектоскопия. 2019. № 12. С. 42–49.

# ИЗМЕРЕНИЕ СТЕПЕНИ ПРОПАЯННОСТИ СОЕДИНЕНИЯ ТОКОВЕДУЩИХ ШИН ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТАНГЕНЦИАЛЬНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С АКТИВНЫМ ЭКРАНИРОВАНИЕМ

© 2023 г. Антон Евгеньевич Горбунов<sup>1\*</sup>, А. Е. Ивкин<sup>1</sup>, П. В. Соломенчук<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Санкт-петербургский Горный университет, 199106 г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2

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

\* - ae.gorbunov.w@gmail.com

Для измерения степени пропаянности стержней статорной обмотки турбогенераторов используется вихретоковый метод с применением накладных экранных вихретоковых преобразователей (ВТП) с нормально расположенными катушками, с частотой тока возбуждения порядка десятков Герц. Указанные экранные ВТП чувствительны только к тем дефектам, которые расположены перпендикулярно плоскости установки катушек ВТП [1].

В конструкции некоторых типов турбогенераторов и электрических машин применяется нахлестное паяное соединение частей токоведущих шин, рис. 1.

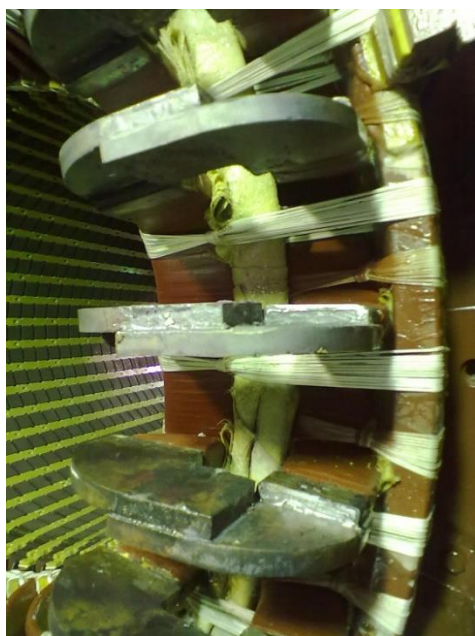


Рис. 1. Нахлестное паяное соединение частей токоведущих шин в лобной части статора турбогенератора.

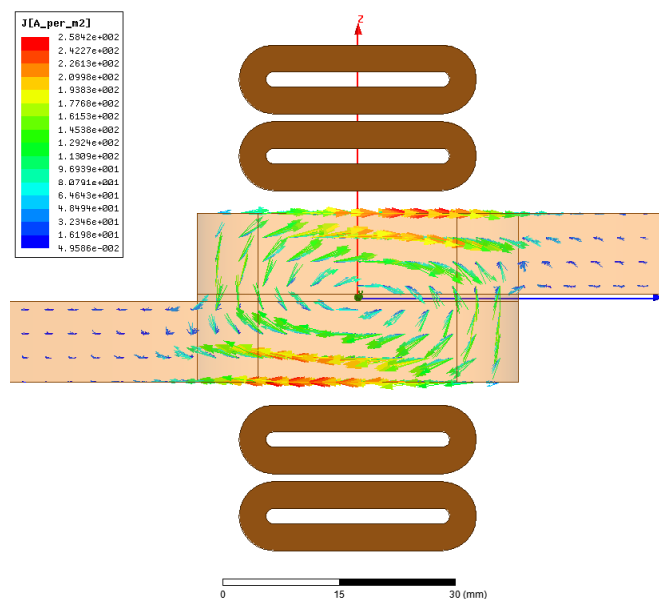


Рис. 2. Структура ВТП с тангенциально расположенными катушками.

В паяных соединениях такого типа дефекты будут расположены в плоскости установки катушек ВТП и не могут быть обнаружены с использованием этих ВТП, а степень пропаянности не может быть измерена. Для измерения степени пропаянности соединений нахлестного типа предлагается использовать ВТП с тангенциально расположенными катушками, рис. 2. Катушки возбуждения включены последовательно в фазе. Каждая из катушек возбуждения воздействует

на свою сторону объекта контроля. Вихревые токи, создаваемые каждой из катушек и направленные встречно токам в катушках возбуждения, образуют общий замкнутый контур вихревых токов, пронизывающих объект контроля. Вихревые токи имеют ненулевую пространственную составляющую, перпендикулярную плоскости, в которой ожидается возникновение дефектов. Эта составляющая вихревых токов обеспечивает чувствительность ВТП с тангенциально расположенными катушками к дефектам, расположенным в плоскости установки катушек ВТП.

Одной из проблем практического применения вихретокового метода для контроля паяных соединений стержней статорных обмоток турбогенераторов является то, что контролируемые паяные соединения расположены в лобовой части статора. В относительно небольшом объеме пространства расположено большое количество соединений, рис. 1.

Наличие крупных электропроводящих объектов возле катушек ВТП является значимым мешающим параметром. Применение традиционного метода экранирования катушек ВТП ферромагнитными экранами не подходит для ВТП с тангенциально расположенными катушками. Для экранирования применяются дополнительные экранирующие катушки, расположенные тангенциально поверх катушек возбуждения и включенные с ними в противофазе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Потапов А.И., Сясько В.А., Коротеев М.Ю., Соломенчук П.В.* Конечно-элементное моделирование преобразователя вихретокового контроля качества паяных соединений обмоток турбогенераторов // Дефектоскопия. 2014. № 5. С. 21–30.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ОБЛАСТИ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДИКИ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ МАГНИТОСТАТИКИ МЕТОДОМ ПОСТРОЕНИЯ МАГНИТНЫХ ЛИНИЙ В ЗОНЕ ДЕФЕКТА

© 2023 г. Андрей Владимирович Никитин<sup>1\*</sup>, А. В. Михайлов<sup>1\*\*</sup>, Л. В. Михайлов<sup>1\*\*\*</sup>,  
Ю. Л. Гобов<sup>1\*\*\*\*</sup>, В. Н. Костин<sup>1\*\*\*\*\*</sup>, Я. Г. Смородинский<sup>1\*\*\*\*\*</sup>

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

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

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

Несмотря на широкое использование метода рассеяния магнитного потока (MFL метод) для диагностики промышленных изделий из ферромагнетиков, его недостатком является то, что это индикаторный метод. Нелинейный отклик ферромагнетика на магнитное поле делает решение обратной геометрической задачи сложным. Этим объясняется отсутствие устройств, позволяющих определять размеры и форму поверхностных дефектов с помощью MFL метода. Впервые для двумерного линейного случая (линейная зависимость вектора магнитной индукции от вектора напряженности магнитного поля), для конфигурации, когда датчики расположены над дефектной поверхностью, задача была решена в работе [1]. Однако для практического применения необходимо продолжить это решение на трехмерный нелинейный случай, что не так просто для предлагаемой в [1] методики. В силу упоминавшегося уже ранее нелинейного отклика ферромагнетика на внешнее магнитное поле и большого разнообразия форм дефектов пока не создано устройств, использующих нейронные сети для определения формы дефектов по результатам измерений в MFL методе. В [2, 3] была впервые разработана методика, позволяющая определять форму поверхностных дефектов ферромагнитной пластины по измеренным компонентам магнитного поля, полученных методом рассеяния магнитного потока. Методика позволяет восстанавливать форму дефектов при измерении компонент магнитного поля вблизи любой поверхности пластины (поверхности с дефектом либо бездефектной поверхности). Методика не применима для определения формы трещин и трещинообразных дефектов [4]. На первом этапе использования методики измеренные в воздухе компоненты магнитного поля пересчитываются в металл на границу металл-воздух на бездефектной поверхности. На втором этапе магнитное поле в металле восстанавливается с помощью решения уравнений Максвелла для случая магнитостатики в предположении, что всюду ниже упомянутой границы также находится металл. На третьем этапе для определения формы дефекта по границам поверхностей пластины в металле строятся 2 силовые магнитные линии. Между ними, по определению, магнитный поток не выходит. И в действительности, величина магнитного потока, выходящего за пределы этих рассчитанных силовых линий (т.е. за пределы ферромагнетика), много меньше величины магнитного потока в металле, поэтому выходом потока даже в зоне дефекта при использовании методики можно пренебречь. Для применения методики на практике необходимо

установить область размеров дефектов, в которой она надежно работает. Этой цели посвящена предлагаемая работа. В работе рассматривались только дефекты, расположенные на обратной к магнитным преобразователям поверхности пластины. Для получения начальных условий при решении обратной геометрической задачи магнитостатики использовались решения прямой задачи с помощью программы ELMER, а также результаты натуральных экспериментов. Было показано, что минимальные размеры дефектов, которые можно определить предлагаемой методикой, составляют: длина 0,3 Т; ширина 0,3 Т; глубина 0,2 Т, где Т – толщина пластины. Для магистральных труб наземных трубопроводов, бурильных и насосно-компрессорных труб значение Т составляет около 10 мм. Эти значения соответствуют минимальным размерам дефектов, надежно определяемых MFL методом, что дает возможность применить предлагаемую методику на практике. На рис. 1 показаны результаты натурального эксперимента для дефекта-лунки радиусом 5 мм и глубиной 2 мм в пластине 400 мм × 200 мм.

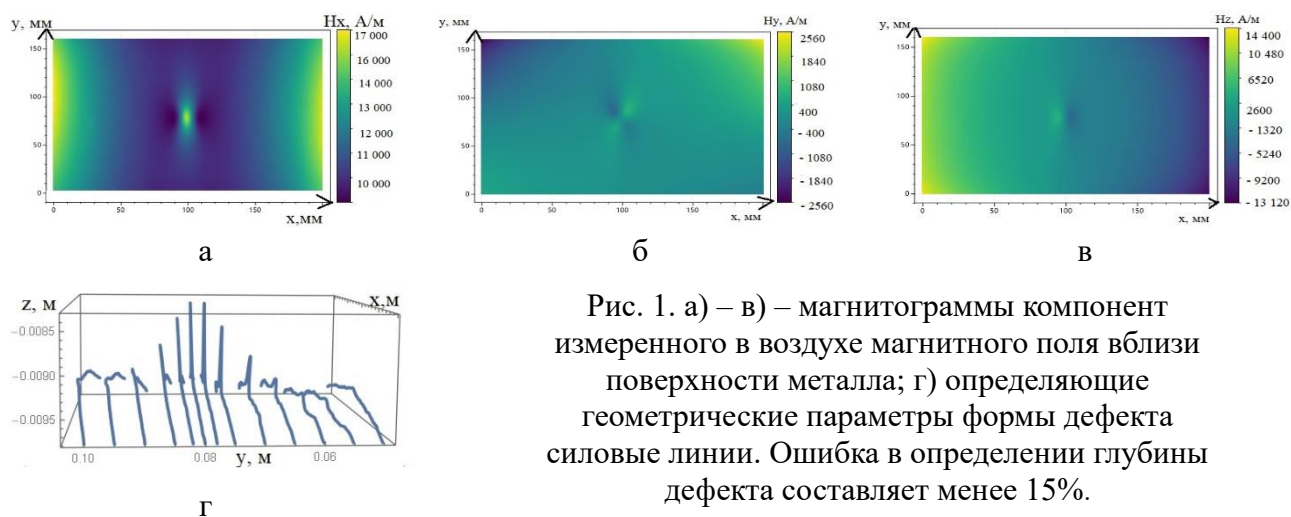


Рис. 1. а) – в) – магнитограммы компонент измеренного в воздухе магнитного поля вблизи поверхности металла; г) определяющие геометрические параметры формы дефекта силовые линии. Ошибка в определении глубины дефекта составляет менее 15%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кротов Л.Н. Реконструкция границы раздела сред по пространственному распределению магнитного поля рассеяния. II. Постановка и метод решения обратной геометрической задачи магнитостатики // Дефектоскопия. 2004. № 6. С. 36–44.
2. Gobov Yu.L., Nikitin A.V., Popov S.E. Solving the Inverse Geometric Problem of Magnetostatics for Corrosion Defects with Allowance for Nonlinear Properties of Ferromagnet // Russian Journal of nondestructive testing. 2018. V. 54. P. 849–854.
3. Nikitin A.V., Mikhaylov A.V., Gobov Yu.L., Popov S.E. Determination of the Surface of Defect Location and Restoration of Its Geometric Parameters by the Mfl Method with One-Sided Access to the Ferromagnetic Plate // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2021. V. 6. P. 45–53.
4. Specifications and requirements for in-line inspection of pipelines. 2016. <https://pipelineoperators.org/>.



## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ОПТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

© 2023 г. Михаил Юрьевич Федотов<sup>1,2\*</sup>

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

<sup>2</sup> – *Российская инженерная академия, 125009 г. Москва, Газетный пер., д. 9, стр. 4*

\* - *fedotovmyu@gmail.com*

В настоящее время эксплуатируется большое количество инженерных сооружений, введенных в эксплуатацию более полувека назад с учетом особенностей нормативной базы, действовавшей на тот период времени. Прежде всего речь идет о промышленных и административных зданиях, мостах, объектах инфраструктуры, выработка ресурса которых составляет по разным оценкам от 40 до 80 %, что, в свою очередь, напрямую влияет на безопасность эксплуатации [1]. Отдельно стоит подчеркнуть актуальность оценки фактического состояния свайных фундаментов инженерных сооружений, эксплуатируемых в условиях Крайнего Севера, где помимо влияния деградиционных процессов на конструкцию оказывает существенное влияние растепление грунтов [2], вызывая дополнительное перераспределение нагрузок, которое в конечном итоге может привести к возникновению аварийных и иных нештатных ситуаций [3].

Одним из наиболее эффективных технических решений, позволяющих определять фактическое напряженно-деформированное состояния подобных объектов, является применение волоконно-оптических систем мониторинга, включающих в себя комплект измерительных устройств (ИУ) на основе волоконно-оптических датчиков (ВОД), чувствительным элементом которых являются, например, волоконные брэгговские решетки (ВБР), анализатор сигналов ВОД (АСВОД), а также специализированное программное обеспечение (СПО) для сбора и обработки данных мониторинга.

Для проведения экспериментальных исследований был выбран объект мониторинга (ОМ) – промышленное здание на свайном фундаменте, эксплуатируемое в суровых условиях Крайнего Севера в Норильском промышленном районе, в качестве АСВОД использовался серийный анализатор ASTRO A313 (РФ, г. Пермь).

Экспериментальные исследования в рамках разработки и адаптации волоконно-оптической системы мониторинга к реальным условиям эксплуатации ОМ выполнялись по следующей методике:

- проводилось обследование свайного фундамента ОМ, по результатам которого проводилась оценка возможности установки ИУ на конкретные сваи на основе анализа данных о наличии тех или иных дефектов и повреждений, измерялись геометрические параметры свай, углы отклонения от вертикали;



- исследовались различные варианты подложек ИУ (металлические, композитные), разрабатывались конструкции ИУ [4], топология ИУ [5];
- проводились монтажные и пуско-наладочные работы волоконно-оптической системы мониторинга на ОМ, осуществлялся мониторинг деформации (с учетом термокомпенсации) свайного фундамента ОМ (рис. 1), анализировались результаты мониторинга.

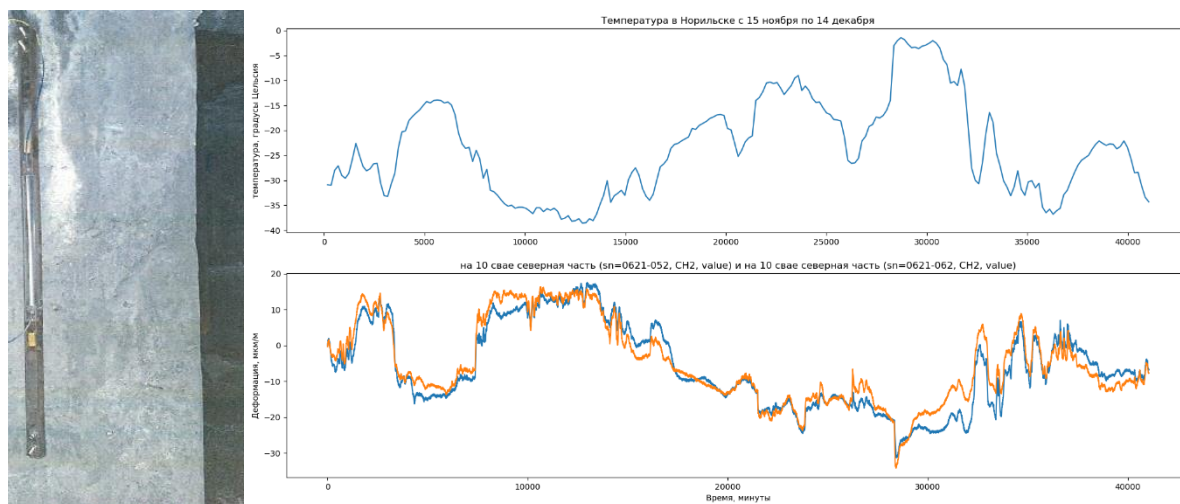


Рис. 1. Результаты мониторинга на свае 10 ОМ (15.11.2022 – 14.12.2022).

Полученные экспериментальные результаты показали, что разработанная система мониторинга эффективно обеспечивает измерение деформации и температуры свайного фундамента в режиме онлайн.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Федотов М.Ю., Кошман Н.П., Гусев Б.В., Сперанский А.А., Лоскутов М.Л., Овчинников И.Г., Бокарев С.А., Шелемба И.С., Будадин О.Н., Козельская С.О. Опыт применения композитных систем внешнего армирования и оптического мониторинга строительных сооружений // Транспортные сооружения. 2019. Т. 6. № 4. С. 8. DOI: 10.15862/09SATS419.
2. Порошина С.С. Растепление вечномёрзлых грунтов под зданиями в Норильске // Градостроительство и архитектура. 2018. Т. 8. № 2(31). С. 65–70. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.02.11.
3. Сазонов А.Д., Комаров Р.С., Передера О.С. Разлив нефтепродуктов в Норильске 29 мая 2020 года: предполагаемые причины и возможные экологические последствия // Экология. Экономика. Информатика. Сер.: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2020. Т. 1. № 5. С. 173–177. DOI: 10.23885/2500-395x-2020-1-5-173-177.
4. Ларин А.А., Федотов М.Ю. Исследование конструктивных параметров измерительных устройств для волоконно-оптической системы мониторинга свайных фундаментов в условиях Крайнего Севера // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 1. С. 43–50. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.01.43-50.
5. Федотов М.Ю., Ларин А.А. Особенности формирования пространственной топологии волоконно-оптической системы мониторинга свайных фундаментов в условиях Крайнего Севера // Контроль. Диагностика. 2023. Т. 26. № 2. С. 42–51.

## МАГНИТОПОРОШКОВЫЙ КОНТРОЛЬ БАНДАЖА КОЛЕСНОЙ ПАРЫ ЛОКОМОТИВА: НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОСНАТКА

© 2023 г. Равиль Абдрахманович Ахмеджанов<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> – Омский государственный университет путей сообщения, 644046

г. Омск, пр. Маркса, д. 35

\* - [makarochkin2004@mail.ru](mailto:makarochkin2004@mail.ru)

На XXXIII Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)» было доложено о результатах улучшения штатной деповской технологии магнитопорошкового контроля (МПК) бандажа колес локомотива, однако эффективность визуализации магнитных индикаций и производительность контроля остались прежними, на уровне штатной в депо технологии.

В представленной на рис. 1 оснастке МПК бандажа операция нанесения магнитного индикатора автоматизирована, сняты ограничения по доступу к зоне визуализации за счет установки седлообразного соленоида в рабочее положение под углом 30–40 градусов к вертикали. Но задача повышения производительности контроля здесь не была решена: длина зоны достаточной намагниченности (ЗДН) так же, как и в деповской технологии, осталась потенциально ограниченной уровнем 40 мм.

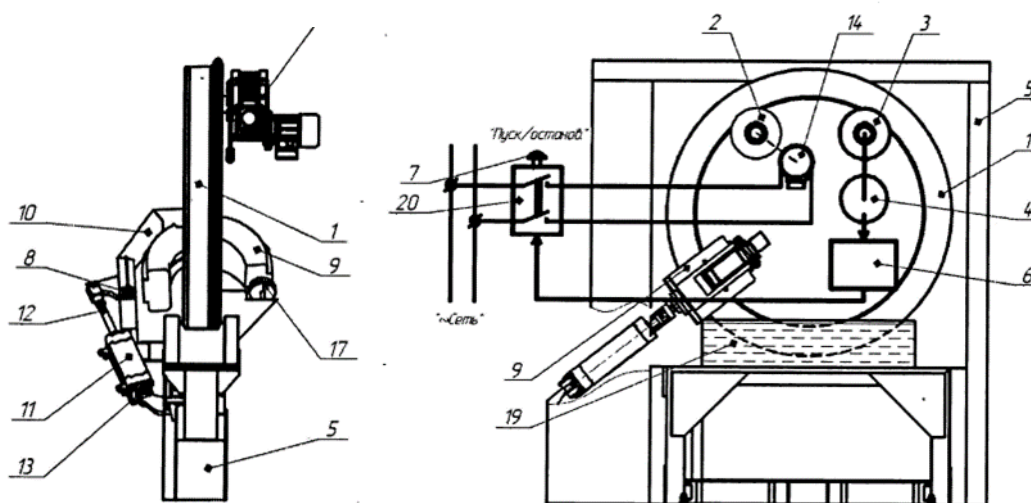


Рис. 1. Стенд МП-контроля бандажа с нанесением суспензии методом окупания.

Данный недостаток был преодолен (рис. 2, 3) путем [1] применения двух последовательно встречно-включенных седлообразных соленоидов 9, размещенных внутри контролируемого бандажа 1 и смонтированных на концах телескопических штанг 10 нормально к внутренней поверхности бандажа, которые своими другими концами шарнирно подвешены к центральному валу 11 с фиксацией радиально-углового их положения с обеспечением достаточной длины ЗДН порядка 250–300 мм и максимально возможного значения тангенциальной составляющей напряженности намагничивающего поля 20–25 А/см [2]. При этом ролик 2 связан со входом

энкодера 5, выходом присоединенного к управляющему входу пускателя 20 привода через формирователь импульса останова 6, генерируемого в момент превышения зоны достаточной намагниченности бандажа. Запуск очередного шага – нажатием кнопки 7.

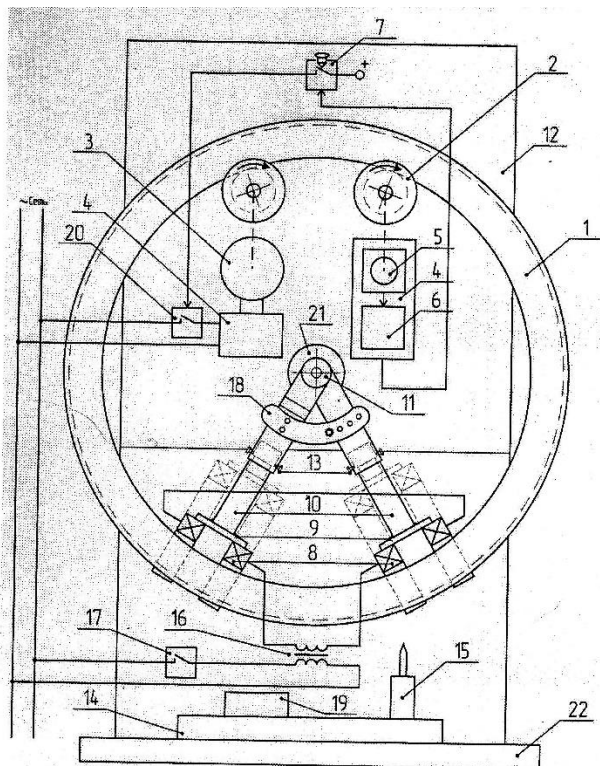


Рис. 2. Стенд МП-контроля бандажа с внутренним размещением двух седлообразных соленоидов.

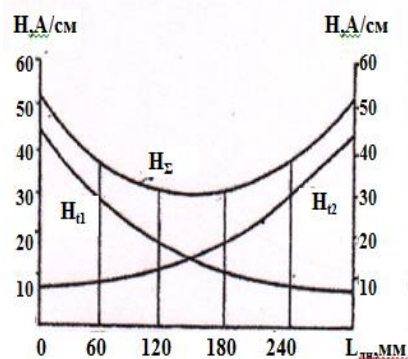
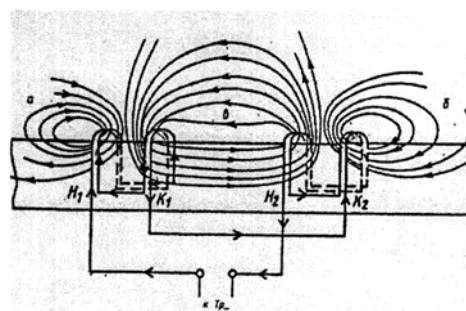


Рис. 3. Схема соединения седлообразных соленоидов и результат формирования суммарной напряженности  $H_{\Sigma}$  в ЗДН.

Можно утверждать, что оператор, нажимая кнопку «Пуск», инициирует далее процесс намагничивания бандажа и контроля в автоматическом режиме, причем с более высокой производительностью и уменьшенной интенсивностью труда за счет превышения более чем в два раза ЗДН. Облегчен труд оператора на начальном (навешивание бандажа) и конечном (съем бандажа) этапах контроля, а также на операции установления упомянутых зазоров. Снижение интенсивности за счет автоматизации работы оператора позволяет сконцентрировать его внимание на операциях визуализации и анализа индикаций, что повышает достоверность МПК бандажа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Авт. свид. СССР 1580241. Устройство для магнитной дефектоскопии / Геккер В.В. Заявл. 08.05.1987. Оpubл. 23.07.1990. Бюллетень № 27.
2. Патент на изобретение (РФ) № 2784038. Стенд магнитопорошкового контроля бандажа колес локомотива / Ахмеджанов Р.А. Заявл. 18.02.2022. Оpubл. 13.01.2023. Бюллетень № 2.

# МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ НЕЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕГО ПОКРЫТИЯ НА НЕМАГНИТНОМ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕМ ОСНОВАНИИ С АВТОМАТИЧЕСКИМ УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ОСНОВАНИЯ

© 2023 г. Михаил Владимирович Сясько<sup>1\*</sup>, И. П. Соловьев<sup>1</sup>, П. В. Соломенчук<sup>2</sup>

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

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

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

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

Для измерения толщины неэлектропроводящего покрытия на немагнитном электропроводящем основании широко применяются амплитудный и частотный вихретоковые методы. Общим характерным ограничением по применению этих методов является влияние изменения удельной электропроводности основания  $\sigma$  на результаты измерения. Учесть влияние этого мешающего параметра можно путем проведения калибровки на непокрытом основании или на объекте контроля с известной толщиной покрытия. На практике часто встречаются ситуации, в которых нет возможности провести калибровку, например:

- измерение толщины покрытия на полностью окрашенном изделии, на котором нет возможности снять покрытие с какого-нибудь участка поверхности для проведения калибровки, при этом значение  $\sigma$  неизвестно;

- значение  $\sigma$  имеет существенную девиацию по поверхности основания изделия или от изделия к изделию;

- изделие имеет разную температуру по поверхности. В этом случае также будет наблюдаться девиация  $\sigma$ .

Для автоматического учета  $\sigma$  при проведении измерений предлагается использовать амплитудно-фазовый вихретоковый преобразователь (АФВТП) и предлагаемый алгоритм обработки измерительной информации.

Структурная схема АФВТП приведена на рис. 1. АФВТП состоит из катушек возбуждения, измерительной и компенсационной, соответственно  $W_b$ ,  $W_i$  и  $W_k$ . Процессор ЦПУ микроконтроллера с помощью ЦАП и усилителя УВ формирует сигнал возбуждения. Сигнал с измерительной и компенсационной катушек, усиленный усилителем УП, оцифровывается с помощью АЦП. Сигнал, прошедший математическую обработку (преобразование Фурье), передается на головное устройство с помощью устройства интерфейса УПИ.

Для градуировки АФВТП используется набор из нескольких оснований с разным значением  $\sigma$ . При градуировке производится построение двумерной градуировочной характеристики, упрощенная графическая интерпретация которой приведена на рис. 2 в виде годографов на комплексной плоскости.



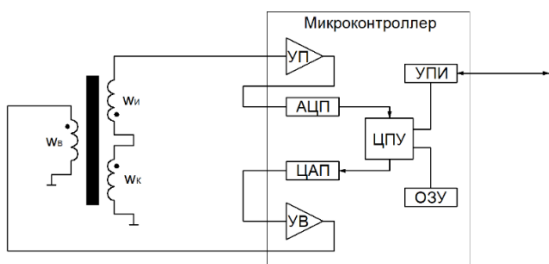


Рис. 1. Структурная схема амплитудно-фазового вихретокового преобразователя.

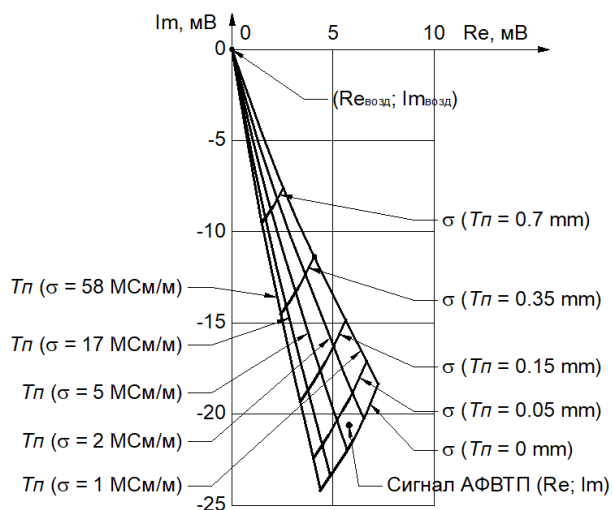


Рис. 2. Графическая интерпретация двухмерной градуировочной характеристики.

На комплексной плоскости отображены годографы влияния изменения толщины покрытия ( $Tп$ ) при постоянном значении  $\sigma$  и линии влияния изменения  $\sigma$  при постоянном значении  $Tп$ . Эти линии образуют сетку, сходящуюся веером в точке  $(Re_{возд}; Im_{возд})$ , полученной при АФВТП, поднятом в воздух. При проведении измерений с АФВТП принимается сигнал  $(Re; Im)$ . Используя алгоритм определения причастности точки многоугольнику, можно определить ближайшие 4 точки, которыми образован четырехугольник, которому соответствует точка полученного с АФВТП сигнала, прошедшего предварительную математическую обработку. В случае, если градуировочная характеристика построена с шагом, соизмеримым с разрешающей способностью толщиномера, полученные результаты могут быть приняты как результат измерения  $Tп$  с учетом влияния  $\sigma$ .

Испытания предлагаемой методики проведены с применением конечно-элементной модели. На первом этапе проведена градуировка модели АФВТП на моделях основания с  $\sigma$ , соответствующими реальным основаниям и равномерно изменяющимся с малым шагом значением  $Tп$ , используемым для градуировки АФВТП. На втором этапе проводилось испытание модели АФВТП на моделях основания с равномерно изменяющимся в логарифмическом масштабе с малым шагом значением  $\sigma$  при нескольких фиксированных значениях  $Tп$ . Максимальное отклонение результатов измерения  $Tп$  составило не более 1,3 мкм в диапазоне  $\sigma$  от 0,5 до 59 МСм/м, что на порядок меньше, чем в случае применения амплитудного или частотного метода в сопоставимых условиях.

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ СКАНЕР СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД

© 2023 г. Вадим Владимирович Мирошников<sup>1\*</sup>, Н. В. Гречишкина<sup>1\*\*</sup>,  
В. Н. Водолазский<sup>1</sup>

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

\* - *prorectormvv@mail.ru*; \*\* - *natalisha.grech@mail.ru*

Контроль действующих промышленных объектов предполагает установку на поверхность контроля многоэлементного сканера, осуществляющего контроль в статическом режиме. Площадь контроля определяется исходя из предполагаемой области нарушения структуры металла. Контролируемая поверхность металла, как правило, имеет следы коррозии, а структура металла по толщине стенки со временем претерпевает структурные изменения. Поэтому для достоверности контроля его следует проводить в постоянном и переменном магнитном поле.

Феррозонд является магниточувствительным элементом, позволяющим регистрировать постоянные и переменные магнитные поля, теория которых в настоящее время достаточно полно разработана. Однако некоторые вопросы требуют дополнительного решения из-за матричного принципа их расположения [1]. Одной из проблем является близкое расположение полуэлементов, которое приводит к их взаимному влиянию и в результате к снижению чувствительности феррозондов.

Максимальное расстояние между полуэлементами в сканере определяется теоремой Котельникова [2]. При ширине спектра  $\Delta\alpha$  намагниченного участка расстояние, при котором не происходит потеря информации, будет равно:

$$\Delta X_m = \frac{\pi}{2\alpha_B},$$

где  $\alpha_B$  – высшая частота спектра функции  $H(x)$ .

Спектральная функция Фурье для нормальной составляющей напряженности поля будет равна:

$$X(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} H_y(x)e^{-j\alpha x} dx,$$

а с учетом ее четности:  $X(\alpha) = 2 \int_0^{\infty} H_y(x)\cos(\alpha x) dx.$

Приближенно зависимость для  $X(\alpha)$  имеет вид:

$$X(\alpha) = H_m \frac{\pi/a}{(\pi/a)^2 - \alpha^2} \cos\alpha a,$$

где  $2a$  – длина положительного значения вертикальной составляющей напряженности поля.

При напряженности поля 1000 А/м значение  $2a = 7,2$  см. При построении графической зависимости  $\Delta\alpha$  определяем значение  $\alpha_e = 18 \frac{1}{\text{м}}$ . Тогда  $\Delta X_m = 8,7$  мм.

Для электромагнитного сканера расстояние между полуэлементами феррозонда не должно превышать 8,7 мм, что приемлемо для конструкции стержневого феррозонда.

В первом приближении порог чувствительности феррозонда, работающего в режиме градиентомера, определяется исходя из описания составляющей вектора напряженности поля рассеяния [3]:

$$H(x) = \frac{H_0}{1 + \beta^2 x^2},$$

где  $H_0$  – максимальное значение напряженности поля,  $\beta$  – определяется из условия, что на расстоянии  $\Delta X_m$  напряженность равна  $\alpha H_0$  при  $0 < \alpha < 1$ .

Тогда  $\beta = \frac{1}{x_0} \sqrt{\frac{1-\alpha}{\alpha}}$ , при этом измеряемое феррозондом поле:

$$H_{и}(x, \Delta x) = H_0 \beta^2 \frac{2x\Delta x + \Delta x^2}{(1 + \beta^2 x^2)(1 + \beta^2 (x + \Delta x)^2)}.$$

Наибольшее значение  $H_{и}(x)$  находится в области, где скорость изменения функции  $H(x)$  максимальна [4]:

$$\frac{dH(x)}{dx} = - \frac{2x\beta^2}{(1 + \beta^2 x^2)^2}.$$

На расстоянии  $\Delta x$  напряженность поля уменьшится на коэффициент  $k = \frac{H_m(\Delta x)}{H_0}$ , что позволяет определить порог чувствительности феррозонда, который находится в пределах 1–3 А/м. Такой порог чувствительности обеспечивается синусоидальным током возбуждения при длине сердечника 4–7 мм и при наличии обмотки компенсации низкочастотных магнитных помех.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шевченко О.І., Мирошников В.В., Шведчикова І.О. Магнітний ферозондовий контроль осей колісних пар // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Кременчуг: КДПУ, 2001. С. 207-209.
2. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. Часть 3. Москва: Изд-во Энергия, 1974. 282 с.
3. Розенблат М.А. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. Москва: Изд-во Наука, 1966. 542 с.
4. Романенко А.В., Яковенко В.В., Мирошников В.В. Розрахунок магнітної проникності осередь ферозондів при їх взаємному впливі // Методи та прилади контролю якості. 2000. № 6. С. 6–8.

## ПОВЫШЕНИЕ СТРУКТУРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ СТАЛЕЙ

© 2023 г. Сергей Григорьевич Сандомирский<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> – Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. Академическая, д. 12

\* - sand\_work@mail.ru

Параметрами предельной петли магнитного гистерезиса сталей, чувствительными к их структуре (плотности дислокаций, величине зерна, наличию и размерам включений, напряжениям и т.д.), являются коэрцитивная сила  $H_c$  и остаточная намагниченность  $M_r$  [1]. К фазовому составу стали чувствительна намагниченность  $M_s$  технического насыщения [2]. Это явилось основой магнитного структурного анализа – определения структуры, фазового состава и физико-механических свойств материалов изделий по их магнитным параметрам [3]. В [4] показано, что все «специфические» изменения магнитных проницаемостей, релаксационных и других магнитных параметров сталей, связанные с изменениями их структурного состояния и фазового состава, обусловлены только происходящими при этом изменениями  $H_c$ ,  $M_r$  и  $M_s$  этих сталей. На основании этого для повышения достоверности магнитной структуроскопии предложено формировать ее информационные параметры из результатов измерения  $H_c$ ,  $M_r$  и  $M_s$  сталей.

Одной из причин, снижающих эффективность использования  $H_c$  и  $M_r$  сталей в магнитном структурном анализе, является наблюдающаяся на практике зависимость  $H_c$  сталей не только от параметров структуры сталей, но и от их фазового состава. В [5, 6] обоснован подход к формированию из  $M_r$  и  $M_s$  сталей информационного параметра  $K_{II} = M_r/M_s$ , обладающего более высокой, чем параметр  $M_r$ , чувствительностью к изменениям структуры сталей, происходящим при их термических обработках, простотой и точностью измерения.

В настоящей работе показано, что магнитный параметр, представляющий собой отношение  $\zeta = H_c/M_s$ , при термических обработках, изменяющих фазовый состав и структуру многих сталей, обладает меньшей, чем параметр  $H_c$ , чувствительностью к параметру  $M_s$  и, значит, к фазовому составу стали. В обоснование этого воспользовались результатами [7] выполненных по стандартным методикам измерений  $H_c$  и  $M_s$  сталей 45 и 40X после отпуска в интервале температур 300–600 °С, приведенными в табл. 1.

Их статистический анализ показал, что коэффициент корреляции  $R$  между  $H_c$  и фазочувствительным параметром  $M_s$  исследованных сталей равен 0,5316 для стали 45 и 0,6100 – для стали 40X, а  $R$  между  $\zeta$  и  $M_s$  этих сталей равен соответственно 0,4803 и 0,5781. Это показывает меньшую, по сравнению с параметром  $H_c$ , чувствительность параметра  $\zeta$  к изменениям фазового состава сталей. Значит, параметр  $\zeta$  больше, чем параметр  $H_c$ , чувствителен к изменениям структуры сталей.



Магнитные параметры  $H_c$  и  $M_s$  сталей 45 и 40X, отпущенных при разных температурах  $T_0$  после закалки в масле от 860°C

$T_0$ , °C	Сталь 45			Сталь 40X		
	$H_c$ , А/м	$M_s$ , кА/м	$10^6 H_c/M_s$	$H_c$ , А/м	$M_s$ , кА/м	$10^6 H_c/M_s$
300	1340	1631	822	1490	1642	822
350	1260	1631	773	1440	1651	773
400	1120	1627	688	1320	1650	688
450	1020	1626	627	1220	1648	627
500	1030	1625	634	1150	1643	634
550	1050	1617	649	1200	1638	649
600	1040	1606	648	1160	1630	648

Результаты позволяют рекомендовать при разработке методов и приборов магнитной структуроскопии сосредоточить внимание на повышении точности измерения отношения  $\xi = H_c/M_s$  материала изделий и использовать результаты измерения этого параметра взамен параметра  $H_c$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Вонсовский С.В., Михеев М.Н.* Магнитный структурный анализ // Заводская лаборатория. 1957. № 10. С. 122—1226.
2. *Анаев Б.А.* Фазовый магнитный анализ сплавов. Москва: Изд-во Металлургия. 1973. 280 с.
3. Неразрушающий контроль. Справочник: В 8 т./ Под общ. ред. *В.В. Клюева*. Т.6: В 3 кн. Кн.1. *Клюев В.В., Мужичицкий В.Ф., Горкунов Э.С., Щербинин В.Е.* Магнитные методы контроля. Москва: Изд-во Машиностроение, 2006. 848 с.
4. *Клюев В.В., Сандомирский С.Г.* Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей. Москва: Издательский дом «СПЕКТР», 2017. 248 с.
5. *Sandomirski S.G., Kostin V.N., Vasilenko O.N.* [et. al] About the Possibilities of Construction and Application of the Generalized Magnetic Parameters of Steel Hardometry after Hardening and Release // AIP Conference Proceedings. 2020. V. 2313. P. 030030. DOI: 10.1063/5.0032978.
6. *Сандомирский С.Г.* Повышение структурной чувствительности остаточной намагниченности сталей // Сборник тезисов XXXII Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)», Екатеринбург, 30-31 марта, 2021. <http://defectoskopiya.ru/pages/view/XXXIIUralConference-abstracts>.
7. *Бида Г.В., Ничипурук А.П.* Магнитные свойства термообработанных сталей. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2005. 218 с.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ  
МОЛОДЕЖНОЙ ШКОЛЫ

# ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕШАЮЩИХ ФАКТОРОВ РУЧНОГО ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ГЛУБИНЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН РЕЛЬСОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

© 2023 г. Сергей Павлович Шляхтенков<sup>1\*</sup>, С. А. Бехер<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – *Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049*

*г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 191*

*\* - shlyakhtenkow@gmail.com*

Одними из наиболее опасных дефектов рельсов являются контактно-усталостные повреждения в виде трещин или сетки трещин на поверхности катания [1, 2]. Для их устранения применяется технология рельсошлифования, эффективность которой напрямую зависит от экспериментальных данных о глубине поверхностных трещин. В настоящее время отсутствуют методы и средства достоверной оценки параметров дефектов поверхности катания рельсов. Это существенно ограничивает возможности эффективного планирования работы рельсошлифовальных поездов для профилактики развития контактно-усталостных повреждений. Создание методики вихретокового контроля для оценки глубины дефектов головки рельсов является актуальной задачей, которая носит общесетевой характер.

Трудность практической реализации вихретокового метода заключается в том, что выходной сигнал вихретокового преобразователя (ВТП) зависит сразу от нескольких параметров объекта контроля (ОК) [3]. Необходимы специальные методы для выделения информации о контролируемом параметре от влияния мешающих факторов: геометрии и состояния поверхности ОК. Достоверность полученных данных во многом зависит от эффективности разработанных способов снижения влияния мешающих факторов.

Целью работы является исследование и разработка способов обработки сигналов ВТП для выделения информации о глубине поверхностных трещин при отстройке от мешающих факторов.

В работе выполнены экспериментальные исследования влияния на амплитуду вихретокового сигнала угла наклона ВТП, кривизны поверхности, зазора между ВТП и ОК. Также определялась разрешающая способность вихретокового дефектоскопа Вектор-60Д. Для уменьшения влияния наклона ВТП использовался амплитудно-фазовый способ. В диапазоне частот от 25 до 400 кГц для трещин глубиной до 0,5 мм максимальная погрешность компенсации воздействия наклона ВТП достигает 10,5 % на частоте 400 кГц, в 6 раз меньше (1,7 %) – на частоте 100 кГц и 1,1 % – на частоте 25 кГц (рис. 1). Действие мешающего фактора не может быть полностью устранено, но влияние его на результаты контроля может быть достаточно эффективно уменьшено.

Оценка разрешающей способности проводилась на образце головки рельса с двумя трещинами, расстояние между которыми 2 мм. На частоте возбуждения вихревых токов 100 кГц,

при смещении центра ВТП (с диаметром 1 мм) от центра трещины на расстояние 0,5 мм происходит спад амплитуды сигнала на 40-60 %. Это позволяет уверенно фиксировать сигналы от нескольких трещин, расстояние между которыми превышает 2 мм.

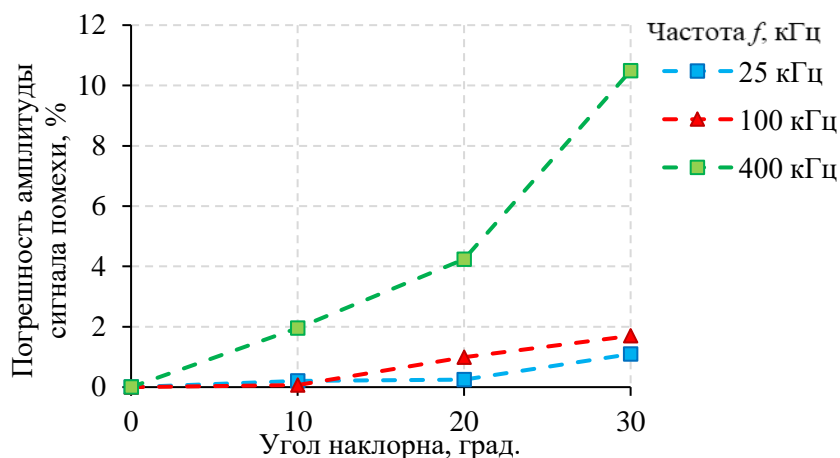


Рис. 1. Зависимость погрешности амплитуды сигнала от угла наклона ВТП при разных частотах возбуждения вихревых токов.

Влияние кривизны поверхности исследовалось на бездефектном участке рабочей выкружки головки рельса. По характеру воздействия наличие кривизны ОК аналогично удалению ВТП, т.е. увеличению зазора и уменьшению модуля вносимого напряжения [3]. Спад плотности вихревых токов в поверхностном слое ОК приводит к появлению нескомпенсированного сигнала, уровень которого будет определяться степенью кривизны поверхности. При этом в характерной зоне развития усталостных трещин, на выкружке рельса, погрешность измерения глубины трещин до 0,5 мм составляет более 20 %. Это требует разработки способов отстройки от воздействия кривизны поверхности на амплитуду сигнала от трещины или уменьшения его влияния на результаты контроля.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Махутов Н.А., Коссов В.С., Оганьян Э.С., Волохов Г.М., Овечников М.Н., Протопопов А.Л. Прогнозирование контактно-усталостных повреждений рельсов расчетно-экспериментальными методами // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 4. С. 46–55.
2. Бельх В.В., Муравьев В.В., Степанов В.А. Использование информационной энтропии структуры стали для определения качества и ресурса ее функциональных свойств // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2020. Т. 23. № 3. С. 15–24.
3. Anouaressadate Aouf, Tarik Bouchala, Abdelhak Abdou, Bachir Abdelhadi. Eddy Current Probe Configuration for Full Rail Top Surface Inspection // Instrumentation Measure Metrologie. 2021. V. 20. № 2. P. 65–72.

## МАТРИЧНЫЙ ВИХРЕТОКОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНДУКТИВНОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА

© 2023 г. Ю. Я. Реутов<sup>1\*</sup>, А. В. Михайлов<sup>1\*\*</sup>, Леонид Вадимович Михайлов<sup>1\*\*\*</sup>

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

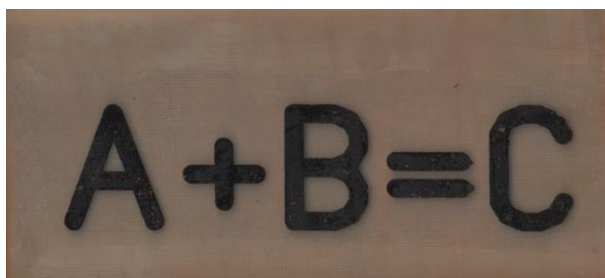
\* - *asija1@yandex.ru*; \*\* - *mikhaylov@imp.uran.ru*; \*\*\* - *mikhaylov lv@imp.uran.ru*

Существует необходимость выявления локальных неоднородностей электромагнитных свойств поверхности металлических изделий. Для достижения наивысшего уровня локализации дефектов предпочтительны сенсоры физических величин с минимальными геометрическими размерами. Линейные массивы таких датчиков могут быть сформированы так, чтобы покрывать всю ширину проверяемого объекта и постепенно перемещаться вдоль него для сканирования всей поверхности. Если эти линейные массивы объединены в матрицу, вся поверхность исследуемого объекта может быть обследована без каких-либо перемещений. Для получения возможности обследовать изделия на более высоких частотах магнитного поля можно применить миниатюрные индукционные катушки, что сделано в работах [1–3]. В настоящей работе рассматривается использование дискретных катушек индуктивности, которые легко доступны благодаря массовому производству современной электронной промышленности.

Была изготовлена печатная плата с расположенными в матрице катушками марки LQH32MN101K23L типоразмера 1210 на ферритовых сердечниках, обладающими индуктивностью 100 мкГн при габаритах 3,2 x 2,5 x 2 мм. Отдельная смонтированная на печатную плату катушка образует накладной вихретоковый преобразователь, который создает в объекте контроля нормальное намагничивающее магнитное поле. Для выяснения влияния формы ферритового магнитопровода на его функционирование было проведено численное моделирование в программе Elcut, которое показало, что наличие у ферритового сердечника замыкающих щечек не ухудшают его способность реагировать на приближение ферромагнитного изделия.

Каждая катушка включалась в состав частото задающего контура разработанного осциллятора с частотой порядка 100 кГц при помощи смонтированных на плату ключевых транзисторов IRLML2502 типоразмера 805. Управление включением транзисторов и измерение частоты тока в катушке осуществлялось микроконтроллером, подключенным к персональному компьютеру. Для осуществления перемещения платы с матрицей была использована механика лазерного гравера с шаговыми двигателями. Для управления всей установкой было разработано программное обеспечение, позволяющее в реальном времени следить за ходом сканирования.

В целях установления границ применимости данной установки была изготовлена печатная плата с нанесенными на ней алгебраическими знаками с высотой шрифта порядка 40 мм (рис. 1).



а



б

Рис. 1. Изготовленная печатная плата (а) и результат ее сканирования (б).

Результаты проведенного исследования представляют перспективу для увеличения разрешения магнитоиндукционного интроскопа, представленного в работе [4]. Авторами предложено использование промышленно выпускаемых катушек, которые позволяют изготовить матрицу вихретоковых преобразователей на одной печатной плате с повышенным разрешением, которое в некоторых случаях может оказаться полезным, что увеличивает область применения таких приборов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Суханов Д.Я., Гончарик М.А. Дистанционное управление индукционными токами // Известия ВУЗов. Физика. 2012. Т. 55. № 8/2. С. 159–162.
2. Суханов Д.Я., Берзина Е.С. Магнитная интроскопия с использованием решётки датчиков магнитного поля // Известия ВУЗов. Физика. 2013. Т. 56. № 8/2. С. 24–27.
3. Суханов Д.Я., Гончарик М.А. Определение формы электропроводящего объекта по дистанционным измерениям возмущений переменного магнитного поля // Известия ВУЗов. Физика. 2013. Т. 56. № 8/2. С. 42–44.
4. Суханов Д.Я., Совпель Е.С. Магнитный интроскоп для дефектоскопии металлических объектов // Дефектоскопия. 2015. № 5. С. 56–62.

## ВХОДНОЙ КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАСТИКОВОЙ ПРОВОЛОКИ НА АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

© 2023 г. Татьяна Сергеевна Абрамова<sup>1\*</sup>, С. А. Бехер<sup>1\*\*</sup>

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

г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 191

\* - *t.abramova658@gmail.com*; \*\* - *behers@mail.ru*

Аддитивные технологии позволяют изготавливать практически любое изделие послойно на основе компьютерной модели. Изначально эти технологии применяли для быстрого создания прототипа, но в последнее время находят широкое применение для прямого изготовления ответственных деталей [1]. Способность выдержать рабочую нагрузку является основным требованием к таким деталям, так как их поломка может привести к отказу или аварии [2]. В настоящее время недостаточно развиты эффективные способы проектирования и контроля качества изделий аддитивного производства, в том числе отсутствуют способы входного контроля материалов, применяемых в 3D-печати. Реализация этого вида контроля позволит повысить качество изделий за счет своевременного обнаружения материалов с недопустимыми механическими характеристиками.

Цель работы – разработка и опробование способа входного контроля пластиковой проволоки, применяемой для изготовления изделий с заданными прочностными характеристиками по аддитивным технологиям.

Для исследования механических характеристик пластиковой проволоки испытаны четыре виды пластика *ABS*, *PLA*, *PETG* по ГОСТ 33366.1-2015 и НИТ-ING. Растяжение проволоки до разрушения проводилось на электромеханической установке МИ-40 КУ, которая обеспечивает одноосное нагружение с постоянной скоростью 5 мм/мин в диапазоне от 0 до 300 мм. Проволока крепилась в захваты установки с помощью специальных переходных элементов, изготовленных на 3D-принтере. Проведено пять испытаний для каждого из материалов. Рабочая длина образцов варьировалась от 20 до 150 мм, диаметр недеформируемой проволоки составлял  $(1,70 \pm 0,05)$  мм.

Результаты испытаний сохранялись в цифровом виде на компьютере. По полученным данным построены графики зависимости силы от относительного удлинения, для каждого из образцов рассчитаны основные механические характеристики (рис. 1). Итоги расчетов для каждого материала отображены в таблице.

При проведении входного разрушающего контроля пластиковой проволоки необходимо обеспечить ее надежную фиксацию, для этого разработаны пластиковые переходные элементы фрикционного типа.

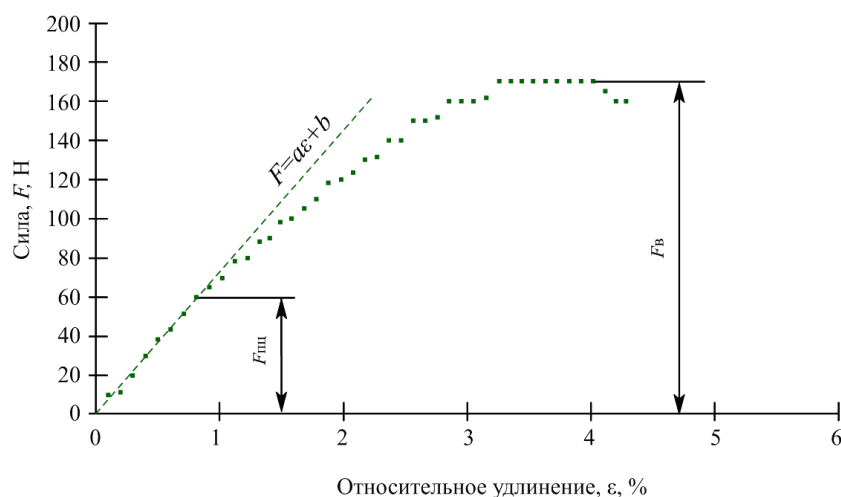


Рис. 1. Зависимость силы от относительного удлинения.

Таблица 1

**Механические характеристики материалов**

Материал	<i>ABS</i>	<i>PLA</i>	<i>PETG</i>	<i>ING</i>
Параметр				
$\sigma_B$ , МПа	46	57	80	145
$\varepsilon$ , %	5	21	4	135

По результатам испытаний были определены пределы упругости и прочности, модуль упругости, остаточные удлинения и сужения. В порядке возрастания предела прочности материалы упорядочиваются: *ABS* (46 МПа), *PLA* (56 МПа), *PETG* (80 МПа), *ING* (145 МПа). В порядке возрастания пластичности по остаточному относительному удлинению: *PETG* (4 %), *ABS* (5 %), *PLA* (21 %), *ING* (134 %).

ЛИТЕРАТУРА

1. Зорин В.А., Тимченко М.И. Применение аддитивных технологий при изготовлении деталей автомобилей // Грузовик. 2018. № 4. С. 16–17.
2. Петров В.М., Безпальчук С.Н., Яковлев С.П. О влиянии структуры на прочность изделий из пластиков, получаемых методом 3D-печати // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2017. Т. 9. № 4. С. 765-776.



## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МЕШАЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ СПЛОШНОСТИ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫМ МЕТОДОМ

© 2023 г. Игорь Сергеевич Гнивуш<sup>1,2\*</sup>, В. А. Сясько<sup>1,2\*\*</sup>, А. С. Мусихин<sup>2\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – Горный университет, 199106 г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., д. 2

<sup>2</sup> – ООО “КОНСТАНТА”, 198097 г. Санкт-Петербург, Огородный пер., д. 21

\* - kin4\_g@mail.ru; \*\* - 9334343@gmail.com; \*\*\* - musihinaleksei@mail.ru

В настоящее время электроискровой метод НК получил широкое распространение для оценки состояния (сплошность, недопустимые утончения и др.) защитных диэлектрических покрытий. Однако на процесс электроискрового контроля могут оказывать влияние факторы, влияющие на достоверность результатов контроля. Одним из таких факторов являются частичные разряды, возникающие перед полным разрядом межэлектродного промежутка [1, 2]. Также при электроискровом контроле лакокрасочных покрытий имеет значение технология и качество подготовки поверхности основания (песко- или дробеструйная обработка), определяющие его шероховатость, и, соответственно, локальную толщину и величину пробивного напряжения.

В работе представлены результаты моделирования напряженности электрического поля в межэлектродных промежутках в зависимости от шероховатости основания. Показано, что основное влияние на пробивное напряжение метода оказывает радиус кривизны выступа локальных пиков ( $r$ ), что может компенсироваться изменением полярности испытательного напряжения в процессе контроля. С другой стороны, высота неровности профиля ( $R_z$ ) практически не влияет на значение пробивного напряжения на электродах.

Также в работе рассмотрено влияние частичных разрядов на процесс электроискрового контроля. Проведен эксперимент по регистрации токовых импульсов частичных разрядов и построены их вольт-секундные характеристики. Показано, что при малых межэлектродных промежутках и больших емкостях газовых включений в процессе контроля могут возникать условия для ложных фиксаций дефектов. Предложено для принятия решения о наличии дефекта в покрытии вместе с измерением амплитуды импульса тока искрового разряда измерять длительность импульса высокого напряжения. Обоснованные и предложенные на основании исследований решения позволяют повысить достоверность результатов неразрушающего контроля электроискровым методом.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. Москва: Изд-во Энергоатомиздат, 1992. 128 с.
2. Редько В.В., Старикова Н.С. Выявляемость дефектов изоляции кабельных изделий при испытаниях высоким напряжением // Контроль. Диагностика. 2014. № 12. С. 69–73.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

© 2023 г. Артём Сергеевич Голев<sup>1\*</sup>, К. В. Гоголинский<sup>1\*\*</sup>, А. С. Уманский<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», 199106

г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2

\* - [artemgolev1999@gmail.com](mailto:artemgolev1999@gmail.com); \*\* - [nanoscan@yandex.ru](mailto:nanoscan@yandex.ru); \*\*\* - [refreshermd@gmail.com](mailto:refreshermd@gmail.com)

Исследования проведены в рамках разработки неразрушающего метода измерения механических свойств металлов и сплавов на основе метода динамического инструментального индентирования (ДИИ) [1]. Целью данной работы является изучение возможности измерения модуля упругости с помощью модифицированного твердомера Либа. Эксперимент проводился на образцах сплавов БрАНЖНМц-9-4-4-1 и стали 20Х23Н18.

Подготовка образцов включала операции точения, шлифовки и притирки к более массивным основаниям. Испытания проводились при помощи динамического преобразователя, соответствующего по своим энергетическим параметрам преобразователю Либа типа D [2], модифицированного для измерения зависимостей силы от внедрения индентора [3]. Запись измерительного сигнала с преобразователя осуществлялась при помощи осциллографа, после чего происходила обработка в программной среде MatLab. Полученный массив данных сигнала переменной ЭДС  $e(t)$  пересчитывался в значение скорости  $v(t)$  при помощи коэффициента пропорциональности  $k$ . Дифференцируя значения скорости, были получены данные о ускорении ударника  $a$ . На основе произведения ускорения и известном значении массы ударника  $m = 5,44$  г была рассчитана контактная нагрузка ударного взаимодействия  $P(t)$ . Интегрируя данные скорости, было получено перемещение ударника  $h(t)$ . На основе расчётов, описанных в [3], были построены кривые зависимости контактной нагрузки от перемещения ударника  $P(h)$ .

Из графиков  $P(h)$  по методике, изложенной в [4], были получены следующие данные: максимальная испытательная нагрузка  $F_{max}$ , максимальная глубина индентирования  $h_{max}$ , остаточная глубина отпечатка после снятия испытательной нагрузки  $h_p$ , глубина  $h_r$ , определяемая точкой пересечения касательной к кривой разгрузки при  $F_{max}$  с осью перемещения  $h$ . По этим данным рассчитаны глубина погружения наконечника в испытательный образец при  $F_{max}$   $h_c$ , площадь поперечного сечения наконечника на расстоянии  $h_c$  от вершины  $A_p(h_c)$ , податливость в месте контакта  $C$ , приведённый модуль упругости  $E_r$  и модуль упругости при индентировании  $E_{IT}$ . При расчёте  $h_c$  брался коэффициент  $\varepsilon$ , равный 0,75, так как ударник имеет сферический наконечник с радиусом 1,5 мм.

Полученные результаты 10 испытаний на каждом образце с рассчитанными статистическими показателями представлены в табл. 1.

## Результаты испытаний

Номер испытания	Модуль упругости при индентировании $E_{IT}$ , МПа	
	БрАНЖНМц9-4-4-1	Сталь 20Х23Н18
1	96417	154330
2	89991	163455
3	82887	160182
4	80587	156899
5	75581	152916
6	80152	153010
7	84477	147741
8	83503	150468
9	81191	153936
10	80732	154245
Параметр	Значение	
Среднее значение, МПа	83552	154718
СКО, МПа	5828	4532
Справочное значение модуля упругости, МПа	106000	204000
Абсолютная погрешность, МПа	22448	49282
Относительная погрешность, %	21	24

Таким образом, значения рассчитанного модуля упругости при индентировании  $E_{IT}$  ниже на 21 % для образца марки БрАНЖНМц9-4-4-1 и на 24 % – для образца стали 20Х23Н18. Результатом исследований можно считать подтверждение перспективности применения метода ДИИ для неразрушающего контроля механических свойств материалов, поскольку полученные значения хорошо коррелируют с табличными данными, однако для повышения точности метода требуются дополнительные исследования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Rudnitsky V.A., Djakovicht V.V. Material testing by the method of dynamic indentation // Nondestructive Testing and Evaluation. 1996. V. 12. No. 4. P. 253–261. DOI: 10.1080/10589759608952849.
2. 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. P. 29. <https://doi.org/10.3390/inventions7010029>.
3. ГОСТ Р 8.969-2019 (ИСО 16859-1:2015) Металлы и сплавы. Определение твердости по шкалам Либа. Часть 1.
4. ГОСТ Р 8.748-2011 (ИСО 14577-1:2002) Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик металлов при инструментальном индентировании.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО КОНТРОЛЯ ВНЕШНЕГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБ В ПОТОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

© 2023 г. Денис Игоревич Антонов<sup>1\*</sup>, В. А. Сясько<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup> – Санкт-Петербургский Горный университет, 199106 г. Санкт-Петербург, 22-я линия В.О., д. 1

<sup>2</sup> – ООО «КОНСТАНТА», 198095 г. Санкт-Петербург, Огородный пер., д. 21, литер А  
\* - antonovden99@mail.ru; \*\* - 9334343@gmail.com

Трубопроводный транспорт является одним из основных способов транспортировки нефти, газа и продуктов их переработки [1]. Для минимизации ущерба от воздействий природной среды и транспортируемых продуктов традиционно применяются разнообразные диэлектрические покрытия на внешней поверхности труб и все большее распространение находят покрытия на внутренней поверхности, обеспечивающие, кроме антикоррозионной защиты, увеличение пропускной способности за счет уменьшения шероховатости внутренней поверхности. Традиционно нанесение защитных покрытий производится в процессе поточного производства труб, что обуславливает необходимость проведения операционного и выходного контроля покрытий (сплошности и недопустимых утонений) там же с использованием автоматизированных систем электроискрового контроля. [2].

Анализ показывает, что современные автоматизированные системы электроискрового контроля, традиционно разрабатываемые на базе ручных приборов, имеют ряд ограничений, связанных прежде всего с трудностью поддержания стабильности контрольного напряжения при существующих схмотехнических решениях, методиках расчета и принципах формирования контрольного напряжения, а также конструкциях электродов, имеющих большую площадь контакта с поверхностью трубы. Данные системы позволяют выявлять только сквозные дефекты покрытий и не позволяют обнаруживать недопустимые утонения, что особенно актуально при контроле внутренних покрытий, наносимых с использованием различных распылительных систем с учетом недостатков систем подготовки поверхности перед покраской.

Для анализа указанных ограничений было проведено исследование процессов искрообразования для постоянноточных и импульсных режимов формирования контрольного напряжения, схем накачки высокого напряжения, а также форм контактной поверхности и материала электродов.

В результате выполнения расчетных и конструкторских работ были разработаны:

- 1) электронный блок, позволяющий формировать импульсное контрольное напряжение амплитудой до 12 кВ с частотой следования до 150 Гц для контроля покрытий толщиной от 150 мкм до 3,5 мм на трубах длиной до 12 м с диаметром от 10 мм до 1500 мм;

- 2) методика расчета контрольного напряжения для выявления мест несплошности и недопустимых утонений в одном цикле контроля;
- 3) принципы создания испытательных образцов внешних и внутренних покрытий труб с искусственными дефектами;
- 4) новые электропроводящие материалы конструкции электродов для контроля наружных и внутренних покрытий, формирующих сильнонеоднородное электрическое поле в зоне контроля и имеющих минимально необходимую постоянную емкость системы «электрод – покрытие – металл трубы», обеспечивающих поддержание постоянства амплитуды контрольного напряжения на бездефектных и дефектных участках покрытия.

Проведены лабораторные и заводские испытания прототипов (опытных образцов) оборудования, подготавливается необходимая технологическая документация для освоения производства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сясько В.А., Потапов А.И. Мониторинг состояния и техническая диагностика объектов транспортной инфраструктуры. Учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехника-сервис, 2022.
2. ГОСТ 31448-2012 Трубы стальные с защитными наружными покрытиями для магистральных газонефтепроводов. М.: Изд-во Стандартиформ, 2013. 11 с.

# РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ПРОСТРЕЛЬНЫХ МИШЕНЕЙ РЕНТГЕНОВСКИХ ТРУБОК ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2023 г. Алиса Андреевна Александрова<sup>1\*</sup>, А. Ю. Грязнов<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup> – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197022 г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5

\* - [a.a.aleksandrova@inbox.ru](mailto:a.a.aleksandrova@inbox.ru); \*\* - [ay-gryaznov@yandex.ru](mailto:ay-gryaznov@yandex.ru)

Все более широкое использование конструкций рентгеновских трубок с прострельным анодом [1] приводит к необходимости точного определения оптимальной толщины мишени, наносимой на выпускное окно трубки. Цель работы – определение оптимальной толщины прострельного анода. Для вычисления оптимального значения толщины мишени необходимо учесть пространственное распределение области генерации рентгеновского излучения в теле мишени и самопоглощение излучения в трубке, которое, в свою очередь, определяется энергетическим распределением квантов и толщиной поглощающего слоя.

Модели, применяемые на практике для описания процесса рассеяния первичного пучка электронов в материале мишени (модели Бете-Блоха [2] и Канайя-Окаяма [3]), не дают представления о глубине, на которой первичный пучок после взаимодействия с атомами материала мишени генерирует рентгеновское излучение. В большинстве работ [4 - 6] указана различная информация о положении максимума интенсивности генерируемого излучения на расстояниях от 1/3 до 2/3 от средней глубины пробега электронов, но даже эти данные в большинстве случаев не учитываются при моделировании интенсивности излучения рентгеновских трубок с прострельными мишенями. С использованием результатов работ [7 - 8] авторами предложена модель, позволяющая учитывать распределение интенсивности генерируемого излучения в зависимости от толщины анода и параметров трубки. Для описания этой модели рассмотрим пример (рис. 1) со следующими условиями: рабочее напряжение трубки – 60 кВ, материал анода – тантал, толщина выпускного бериллиевого окна – 200 мкм, ослабление в мишени не учитывается. Рассчитанная максимальная глубина проникновения электронов, падающих на поверхность мишени, составила 3,9 мкм.

Рассчитывая распределение интенсивности генерируемого излучения по глубине проникновения электронов с учетом двух вышепредложенных моделей, можно получить зависимость интенсивности излучения от толщины мишени (рис. 2). Наглядно видна разница в максимумах интенсивности в зависимости от выбранного распределения, а также существенное влияние толщины мишени на интенсивность выходящего из трубки излучения. Для описанных выше условий в случае первого варианта распределения оптимальной является толщина мишени ~ 3 мкм, второго – 3,5 мкм. Традиционно в подобных конструкциях рентгеновских трубок на напряжения 50-100 кВ используют мишени толщиной 5-7 мкм, что, как видно, ведет снижению интенсивности примерно в 1,5 раза по сравнению с теоретически возможной.

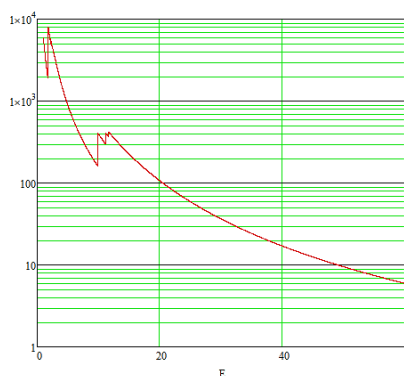


Рис. 1. Спектральная зависимость линейного коэффициента ослабления для тантала (на 1 мм).

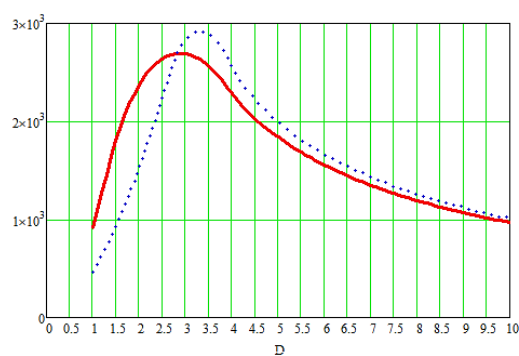


Рис. 2. Зависимость интенсивности излучения от толщины прострельной мишени. Сплошная линия – при максимуме на 1/3 длины свободного пробега, пунктирная – на 2/3 длины свободного пробега.

Таким образом, предложенная модель расчета зависимости интенсивности излучения от толщины мишени учитывает характер распределения генерируемого тормозного и характеристического тормозного излучения по глубине проникновения электронов, материал мишени и энергию первичного пучка, что позволяет применять ее при расчете толщин мишеней трубок с прострельным анодом, а также толщин мишеней в различных видах ускорителей. Необходимо отметить, что вопрос о распределении относительной интенсивности генерируемого излучения по оси первичного пучка в теле мишени остается открытым и будет изучен по результатам дальнейших экспериментов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов С.А., Щукин Г.А. Рентгеновские трубки технического назначения. Ленинград: Изд-во Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние. 1989. 200 с.
2. Макаров Д.Н. Потери энергии при столкновении заряженных частиц с осциллятором // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. Вып. 4. С. 7–12.
3. Kanaya K., Okuyama S. Penetration and energy-loss theory of electrons in solid targets // J. Phys. D: Appl. Phys. 1972. V. 5. P. 43–58.
4. Корепанов В.И. Импульсный люминесцентный анализ: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета. 2008. 131 с.
5. Калмыков К.Б., Дмитриева Н.Е. Сканирующая электронная микроскопия и рентгено-спектральный анализ неорганических материалов: методическое пособие для студентов химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Москва. 2017. 59 с.
6. Зубавичус Я.В., Словохотов Ю.Л. Рентгеновское синхротронное излучение в физико-химических исследованиях // Успехи химии. 2001. Т. 70. Вып. 5. 35 с.
7. Патент № 2014618547 РФ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для моделирования спектров излучения «Спектрон»: заявл. 01.07.2014; опубл. 20.09.2014. / Холопова Е.Д., Бессонов В.Б., Грязнов А.Ю., Жамова К.К., Лившиц А.О., Кунашик Е.С.
8. Холопова Е.Д. Учет характеристик детектора рентгеновского излучения при моделировании вторичных спектров // Сборник материалов X науч.-практ. конф. “Наука настоящего и будущего”. Т. 1. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. 246 с.
9. Маренков О.С. Таблицы и формулы рентгеноспектрального анализа. Методические рекомендации. Л.: Изд-во Машиностроение. 1982. 101 с.

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МЕХАНИЗИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ МЕТОДАМИ ФР+ТОФД С ПРИМЕНЕНИЕМ ДЕФЕКТΟΣКОПА УСД-60ФР-16/128

2023 г. Даниэль Аджибае Адебайо<sup>1,2\*</sup>, М. П. Савичев<sup>1,2\*\*</sup>, В. В. Агрощенко<sup>1,2\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – Уфимский университет науки и технологий, 450076 г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32

<sup>2</sup> – Головной аттестационно-сертификационный центр Республики Башкортостан, 450001 г. Уфа, ул. Пархоменко, д. 155/1

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

В настоящее время в действующих нормативных документах [1 –3] представлено около пяти различных схем настройки фазированной решетки. При этом стандарт [1] определяет четыре уровня контроля (А, В, С и D) и устанавливает, что от уровня контроля А до уровня контроля С возрастает вероятность выявления дефектов. Для уровня контроля С следует применять совместно по меньшей мере две схемы, одна из которых должна быть S-сканом или TOFD. Однако во всех вышеуказанных документах и литературных источниках [4] нет достаточных сведений об эффективности выявления сварочных дефектов разного типа каждой из настроек.

Целью работы является разработка рекомендаций по выбору схемы сканирования и способа фокусировки при проведении механизированного ультразвукового контроля кольцевых сварных соединений трубопроводов толщиной 16 мм методом ФР.

Эксперименты производились на оборудовании УСД-60ФР-16/128 с 32 элементной с фазированной решеткой (ФР) на 32 элемента, датчиками TOFD частотой 10 МГц и углом 60 градусов и ручным универсальным сканером PASCAN2-TOFD. В качестве исследуемых образцов применялись трубы марки К56, диаметром 530 мм, толщиной 16 мм, сваренные встык ручной дуговой сваркой плавящимся электродом.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Изготовлены образцы с различными типами искусственных дефектов: непроварами в корне, несплавлением по разделке кромок, несплавлением между валиками, объёмными дефектами (скоплениями пор, шлаковыми включениями, вольфрамовыми включениями). Дефекты закладывались искусственно по отработанной методике.

2. Проведен ультразвуковой контроль образцов одноэлементным датчиком (2,5 МГц, 60 град.) и цифровая радиография. Результаты контроля обоими методами были объединены, и составлена дефектограмма каждого образца, содержащая тип дефекта, его размеры и координаты залегания.

3. Произведена настройка фазированной решетки дефектоскопа пятью схемами сканирования (линейное сканирование, линейное сканирование с использованием двух углов ввода, секторное сканирование, секторное сканирование двумя апертурами, комбинирование



линейного и секторного сканирования) и четырьмя способами фокусировки (по лучу, по глубине, по расстоянию и автоматическая фокусировка). Таким образом получено 20 разных настроек.

4. Выполнена настройка методом TOFD по классу А непосредственно на объекте контроля (без настроечных образцов) в соответствии с действующими нормативными документами [4]. При этом был произведен анализ критериев идентификации и интерпретации дефектов на сканах TOFD.

5. Результаты контроля сравнивались с эталонной дефектограммой. и анализировались результаты по выявляемости дефектов разного типа.

В результате анализа полученных результатов и сопоставления их с эталонной дефектограммой выявлено, что схемы с секторным сканированием лучше выявили объёмные дефекты за счет прозвучивания под разными углами. Однако несплавления они выявили значительно хуже, а некоторые – не обнаружили. При секторном сканировании сильно влияла ориентированность дефектов к направлению прозвучивания. Это удавалось компенсировать за счет фокусировки. Наилучшие результаты контроля получены при фокусировке по расстоянию – на центр сварного соединения. При линейной схеме сканирования были обнаружены все несплавления по разделке кромок. Следует отметить что применение линейной схемы сканирования не всегда возможно, так как требуется большая апертура фазированной решетки и большие вычислительные мощности дефектоскопа.

Таким образом, при использовании указанного оборудования рекомендуется линейное сканирование для поиска несплавлений по разделке кромок. Секторное сканирование допускается применять только с комбинацией TOFD за счет вероятности пропуска несплавлений, что и указано в стандарте [1].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ ISO 13588-20. Неразрушающий контроль сварных соединений. Ультразвуковой метод. Автоматизированная технология с применением фазированной решетки.
2. ГОСТ Р 50.05.13-2019. Система оценки соответствия в области использования атомной энергии ультразвуковой контроль сварных соединений с применением технологии фазированных решеток. Порядок проведения.
3. РД-25.160.10-КТН-016-15. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Неразрушающий контроль сварных соединений при строительстве и ремонте магистральных нефтепроводов.
4. ГОСТ ISO 10863-2022. Неразрушающий контроль сварных соединений. Ультразвуковой контроль. Применение дифракционно-временного метода (TOFD).
4. *Садкин К.Е., Кушнер А.В., Сужаева А.С., Кочергин Д.В., Топинко А.Ю., Останин И.А.* Внедрение современных технологий ультразвукового контроля сварных соединений изделий морской техники. Часть 2. Исследование выявляемости дефектов при ультразвуковом контроле многоэлементными преобразователями // Сварка и диагностика. 2022. № 5. С. 33–38.

## ВОЗМОЖНОСТЬ ОЦЕНКИ ФАЗОВОГО СОСТАВА АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ

© 2023 г. М. К. Корх<sup>1\*</sup>, Александр Викторович Кочнев<sup>1\*\*</sup>, М. Б. Ригмант<sup>1\*\*\*</sup>

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

\* - korkhmk@imp.uran.ru; \*\* - kochnevav@imp.uran.ru; \*\*\* - rigmant@imp.uran.ru

Аустенитные стали используют для изготовления ответственных деталей и узлов установок, где предъявляют высокие требования к коррозионной стойкости, жаропрочности и ударной вязкости. Необходимые эксплуатационные свойства определяются химическим и фазовым составом, а именно количественным содержанием в металле ферромагнитных фаз: феррита и мартенсита. При их одновременном содержании в стали количественное определение содержания одной из этих фаз становится затрудненным, так как использование традиционных методик ферритометрии позволяет узнать только общий процент содержания ферромагнитных фаз.

Цель данной работы – исследование одновременного наличия феррита и деформационного мартенсита в аустенитной стали с использованием модельных образцов.

Для исследования были отобраны образцы аустенитных хромоникелевых сталей 06X18H11 и 09X17H5Ю-ВИ, часть из которых имела аустенитно-ферритный состав, в то время как остальные – аустенитно-мартенситный. Два образца одинакового размера (по образцу из каждой группы) помещались в дифференциальную катушку, таким образом можно было смоделировать содержание трёх фаз в стали. Далее снимались кривые  $\chi_{dif}(H)$ , на рис. 1 приведен пример кривой для такого «составного» образца. На зависимости довольно отчетливо наблюдается наличие двух пиков, которые можно отделить друг друга, используя разложение по Лоренцу [1, 2]. Предварительно были сняты кривые  $\chi_{dif}(H)$  для одиночных образцов.

Площади под восстановленными мартенситными кривыми в составных образцах оказываются всегда больше площадей  $S_M$  под кривыми для одиночных мартенситных образцов на величину, пропорциональную процентному содержанию феррита в составном образце (рис. 2):

$$S_M^* - \Delta_\alpha \cdot \alpha_\% = S_M, \quad (1)$$

где  $S_M^*$  – площадь под восстановленной мартенситной кривой,  $\alpha_\%$  – процентное содержание феррита,  $\Delta_\alpha$  – некоторый коэффициент пропорциональности.

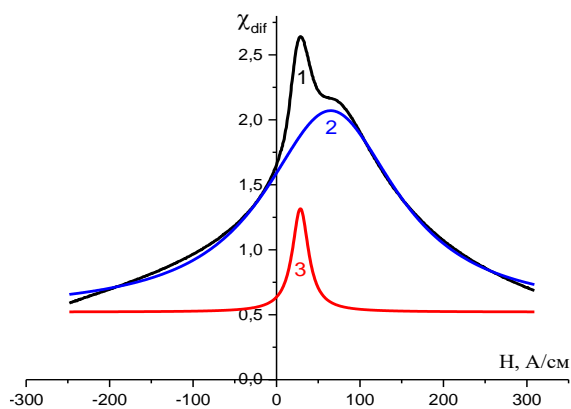


Рис. 1. Зависимость  $\chi_{dif}(H)$  для составного модельного образца и пример её разложения на два пика по Лоренцу:  
 1) экспериментальная зависимость;  
 2) зависимость для мартенситной составляющей;  
 3) зависимость для ферритной составляющей.

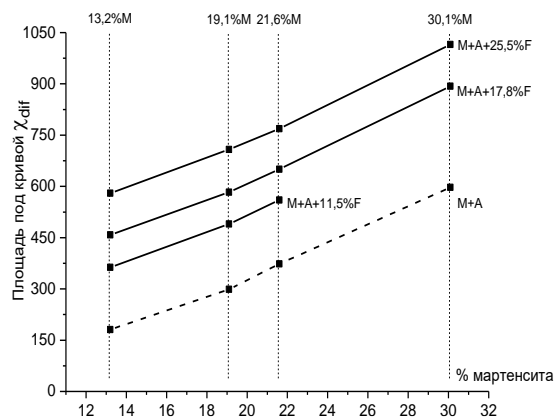


Рис. 2. Влияние содержания фазы феррита (F) на рассчитанную площадь под кривой  $\chi_{dif}$  при фиксированном содержании мартенсита в аустенитной основе.

Площадь под кривой  $\chi_{dif}(H)$  для двухфазных образцов возрастает линейно при увеличении ферромагнитной фазы:

$$S_M = k \cdot \alpha'_{\%} + b, \quad (2)$$

где  $k$  и  $b$  – коэффициенты уравнения для линейной аппроксимации на рис. 2;  $\alpha'_{\%}$  – процентное содержание мартенситной фазы в образце.

Суммарное содержание  $\alpha_{\%}$  и  $\alpha'_{\%}$ , определяемое с помощью традиционных методов ферритометрии:

$$\Sigma_{\alpha+\alpha'} = \alpha_{\%} + \alpha'_{\%}. \quad (3)$$

Итоговая система уравнений с двумя неизвестными  $\alpha_{\%}$  и  $\alpha'_{\%}$  имеет вид:

$$\begin{aligned} S_M^* - \Delta_{\alpha} \cdot \alpha_{\%} &= k \cdot \alpha'_{\%} + b, \\ \alpha_{\%} + \alpha'_{\%} &= \Sigma_{\alpha+\alpha'}. \end{aligned} \quad (4)$$

Система уравнений (4) позволяет получить достаточно точные значения как процентного содержания фазы феррита, так и фазы мартенсита в трехфазном материале аустенитных хромоникелевых сталей [2].

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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. Т. 9. С. 19–23.
2. 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. Т. 12. С. 20–31.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОВЕРШЕНСТВА СТРУКТУРЫ КРИСТАЛЛОВ LiCaAlF<sub>6</sub> МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНОЙ АКУСТИКИ

© 2023 г. Евгения Богдановна Желева<sup>1\*</sup>, В. В. Семашко<sup>1,2\*\*</sup>, А. А. Шавельев<sup>1</sup>,  
О. А. Морозов<sup>1,2</sup>, В. М. Кяшкин<sup>1</sup>, А. А. Карабутов<sup>2</sup>, Ю. П. Бродниковский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – ФГАОУ ВО КФУ, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18

<sup>2</sup> – КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, 420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7

\* – [stillsennin@mail.ru](mailto:stillsennin@mail.ru); \*\* – [ua4pcy@mail.ru](mailto:ua4pcy@mail.ru)

Кристаллическая матрица LiCaAlF<sub>6</sub> (LiCAF) имеет наибольшую ширину запрещенной зоны (~100000 см<sup>-1</sup>) среди известных материалов, что позволяет при ее активации ионами Ce<sup>3+</sup> реализовать УФ перестраиваемый лазер с уникальными характеристиками [1]. Кроме того, благодаря своим спектрально-кинетическим свойствам и относительно узкой ширине фононного спектра (< 600 см<sup>-1</sup>), кристаллы Cr:LiCAF успешно конкурирует с известными активными средами Cr<sup>3+</sup>:BeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> и даже с Ti<sup>3+</sup>:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, демонстрируя высокую энергетическую эффективность лазерной генерации, возможность накачки излучением импульсных Хе-ламп или лазерных диодов с длиной волны ~650 нм в сочетании с удобством технической реализации и эксплуатации [2]. Однако выращивание совершенных кристаллов LiCAF затруднено и разработка технологии их синтеза остается актуальной. Целью настоящей работы является оценка возможностей использования лазерно-акустической методики для характеристики совершенства синтезируемых кристаллов LiCAF.

Образцы кристаллов LiCAF были выращены из расплава методом Бриджема в НИЛ МРС и КЭ им. С.А. Альтшулера КФУ. Было установлено, что по всей их длине наблюдается анизотропное рассеяние света на микроскопических дефектах неизвестной природы, которые успешно устраняются 48-часовым отжигом образцов в атмосфере SF<sub>4</sub> при температуре на 10-15 °С ниже температуры плавления кристалла. Отжиг также значительно улучшил оптическую однородность образцов, измеряемую с помощью интерферометра Жамена (в отожженных кристаллах  $\Delta n \leq 1,2 \times 10^{-5}$ ). Рентгеноструктурный анализ с пространственным разрешением показал, что в неотожженных образцах имеет место микроблочность по всему их объему. Размер блоков достигает несколько десятков микрометров, а блоки разориентированы между собой на угол до 0,15°. Отжиг приводит к увеличению размеров блоков и уменьшению их взаимной разориентации до долей миллиметров и 0,03-0,04°, соответственно.

Образцы кристаллов до и после отжига также были исследованы методом контактной лазерно-акустической структуроскопии с использованием дефектоскопа УДЛ-2М. Особенностью данного прибора является генерация короткого импульса ультразвука длительностью 50-70 нс. Прибор позволяет осуществлять прецизионные измерения скоростей продольных и сдвиговых ультразвуковых волн (УЗВ), локально определять механические константы образцов, исследовать частотно-зависимые характеристики затухания ультразвука. Принцип работы прибора приведен на рис. 1. Ультразвук генерируется с помощью короткого лазерного импульса, поглощаемого пластинкой оптико-акустического генератора. При падении продольных УЗВ (1) на свободную донную поверхность объекта продольная волна не только отражается

(импульс (2)), но и конвертируется в сдвиговую волну (импульс (3)). Акустические сигналы детектируются широкополосным пьезодетектором, оцифровываются и обрабатываются персональным компьютером. Типичные временные зависимости акустических сигналов, регистрируемых в различных точках образцов, представлены на рис. 2.

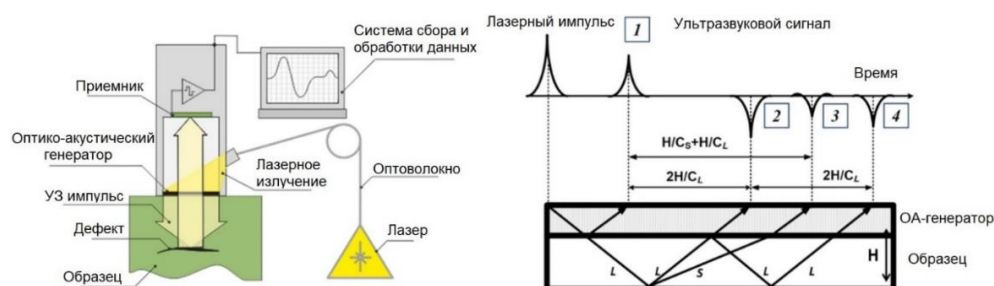


Рис. 1. Принцип работы прибора УДЛ-2М. 1 – импульс продольной УЗВ, генерируемый пластинкой оптико-акустического генератора, 2 и 3 – регистрируемые импульсы продольной УЗВ, отраженный от задней поверхности образца, и импульс, частично преобразованный в сдвиговую УЗВ (донные сигналы), 4 – импульс после повторных отражений,  $H$  – толщина образца,  $C$  – скорости УЗВ, индексы  $L$  и  $S$  – относятся, соответственно, к продольным и сдвиговым УЗВ.

Коэффициент затухания определялся путем измерения амплитуд донных сигналов и аппроксимации экспоненциальной функцией их уменьшения со временем. Установлено, что коэффициент затухания в неотожженных образцах достигал  $0,93 \text{ см}^{-1}$ , тогда как в образцах после отжига он составил лишь  $0,6 \text{ см}^{-1}$ . Также были проведены исследования зависимости скорости звука, механических констант в отожженных и неотожженных образцах. Полученные данные укладываются в представления о рассеянии УЗВ на границах микроблоков.

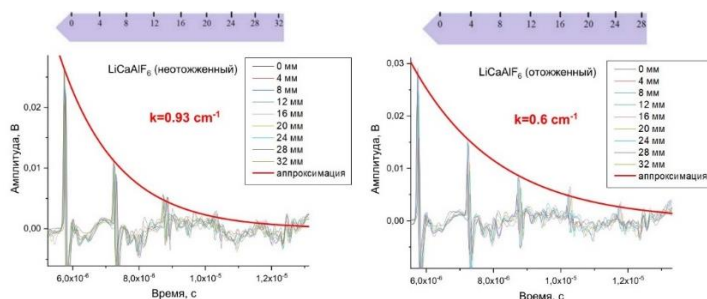


Рис. 2. Пространственные зависимости затухания ультразвуковых импульсов в отожженных и неотожженных кристаллических образцах  $\text{LiCaAlF}_6$ .

Таким образом, совокупность проведенных исследований позволяют утверждать, что наблюдаемое рассеяние света в неотожженных образцах обусловлено их блочной структурой, а метод лазерно-акустической дефектоскопии может с успехом применяться для локальной оценки совершенства структуры прозрачных и непрозрачных материалов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Semashko V.V. Problems in searching for new solid-state UV-and VUV-active media: The role of photodynamic processes // Phys. Solid State. 2005. V. 47. P. 1507–1511.
2. Demirbas U. Cr:Colquiriite Lasers: Current Status and Challenges for Further Progress // Progress in Quantum Electronics. 2019. V. 68. P. 100227.

## МОНИТОРИНГ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБУЧЕНИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

© 2023 г. Дарья Ивановна Школина<sup>1\*</sup>, С. А. Бехер<sup>1\*\*</sup>

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

\* – *dashashkolina@mail.ru*; \*\* – *behers@mail.ru*

Задачей любого предприятия является поддержание высокого уровня квалификации сотрудников. Традиционно эта задача решается за счет периодического прохождения программ повышения квалификации, переподготовки кадров и сертификации [1, 2]. В соответствии с целями предприятия процесс обучения может быть организован с полным или частичным отрывом от производства, а также без отрыва, непосредственно на рабочем месте. Достоверность и надежность производственных процессов на предприятиях железнодорожной отрасли [3, 4], включая процесс неразрушающего контроля (далее по тексту НК), связаны с влиянием субъективных факторов [5]. Об актуальности темы исследования свидетельствует тот факт, что до 80 % всех транспортных происшествий связаны с влиянием «человеческого фактора» [6].

Целью работы является мониторинг результатов технического обучения специалистов, выполняющих НК деталей грузовых вагонов, для непрерывной оценки соответствия.

В вагонные ремонтные депо внедрен программный комплекс, содержащий мультимедийные учебные пособия, отражающие основные положения актуальной нормативной документации, учитывающие особенности контроля узлов и элементов вагонов, а также применяемое оборудование и средства контроля, тестовые и интерактивные задания. Программный комплекс связан с базой специалистов в автоматизированном рабочем месте мастера НК. Наличие связи базы данных с результатами технических занятий и результатами процессов НК позволяет проводить анализ соблюдения технологии контроля и формировать индивидуальный план технических занятий дефектоскопистов для совершенствования компетентности кадрового состава подразделения (рис. 1).

Проанализированы результаты технического обучения 900 дефектоскопистов по трем направлениям: оценка тестирования по учебным темам, оценка времени ответа и оценка вопросов, на которые получено более 50 % неправильных ответов. Выявлены учебные темы и вопросы, которые вызывают наибольшие затруднения. Показателем степени освоения учебных материалов является среднее время ответа на один вопрос. На основе исследования установлено, что 80 % времени затрачивается на прочтение, осмысление вопроса и предлагаемых вариантов ответа, поиск ответа в учебных материалах, при необходимости, и только 20 % – на принятие решения и ответ.

Установлена зависимость с коэффициентом корреляции  $R = 0,85$  между количеством правильных ответов в одной учебной теме и средним временем, затрачиваемым на один вопрос.



Рис. 1. Алгоритм организации индивидуальных технических занятий дефектоскопистов.

Предложенное техническое решение направлено на совершенствование системы управления подразделениям НК за счет непрерывного поддержания высокого уровня квалификации дефектоскопистов и устранения несоответствий, вызванных человеческим фактором.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Nedeliaková Eva, Štefancová Vladimíra, Kudláč Štefan. Six Sigma and Dynamic Models Application as an Important Quality Management Tool in Railway Companies // *Procedia Engineering*. 2017. V. 187. P. 242–248. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.371.
2. Муравьев В.В. Анализ результатов сертификации специалистов в области неразрушающего контроля объектов железнодорожного транспорта // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2013. № 2. С. 144–148.
3. Vorobyov Valery, Manakov Aleksey, Yanshina Irina, Repina Irina. Bases of the methodology of monitoring the impact of the human factor on the reliability of the railway infrastructure // *Advances in intelligent systems and computing*. 2020. 1116 AISC. P. 691-706. doi: 10.1007/978-3-030-37919-3\_69.
4. Аксенов В.А., Завьялов А.М., Синякина И.Н., Завьялова Ю.В. Оценка влияния человеческого фактора на надежность производственных процессов и технических систем железнодорожного транспорта // *Наука и техника транспорта*. 2019. № 2. С. 120–125.
5. Bekher Sergey, Kolomeets Andrei. Automation of control processes in the non-destructive testing units // *MATEC Web of Conferences*. 2018. V. 239. P. 01025. doi: 10.1051/mateccconf/201823901025.
6. Kyriakidisa Miltos, Majumdarb Arnab, Ochieng Washington Yotto. The human performance railway operational index – a novel approach to assess human performance for railway operations // *Reliability Engineering & System Safety*. 2018. V. 170. P. 226–243.

## ОПЫТ КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНЫХ БАЛОК АВТОМОБИЛЬНОГО МОСТА

© 2023 г. Вадим Степанович Мальцев<sup>1\*</sup>, С. М. Кулак<sup>1\*\*</sup>, В. Ф. Новиков<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – Тюменский Индустриальный Университет, 625000 г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38

\* - [coreboxe@gmail.com](mailto:coreboxe@gmail.com); \*\* - [ksm-rabochi@rambler.ru](mailto:ksm-rabochi@rambler.ru); \*\*\* - [vitaly.nowikov2017@yandex.ru](mailto:vitaly.nowikov2017@yandex.ru)

Важной задачей по обеспечению надёжной и безопасной эксплуатации металлических конструкций является определение их напряжённо-деформированного состояния (НДС) [1].

В работах [2–4] предлагается использовать для контроля НДС стальных конструкций метод магнитоупругого размагничивания (магнитоупругой памяти (МУП)). Суть метода МУП заключается в том, что напряженность магнитного поля рассеяния локальной остаточной намагниченности (ЛОН) стали убывает с ростом механических напряжений в ней. Метод МУП привлекателен простотой реализации, не требует применения дополнительного оборудования, способен повысить автоматизацию контроля и эффективность тензорезистивного метода, а также работать в режиме запоминания максимальной нагрузки, создаваемой в объекте контроля.

Цель работы – исследование магнитоупругого размагничивания элементов стальных конструкций автомобильного моста, испытывающих напряжения растяжения  $\sigma_{\text{раст}}$ , вызванные их изгибом от проезжающего транспорта.

Исследование проводилось на восьми двутавровых балках автомобильного моста. В отсутствие интенсивного движения транспорта производилось локальное намагничивание с поверхности нижних полок балок в местах их максимальной деформации (в центре балки). Измерялось начальное значение  $H_{0\sigma}$  напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН. В течении одного месяца повторно производились измерения  $H_{0\sigma}$  в тех же точках.

На рис. 1 показана диаграмма относительного изменения  $\delta H_{0\sigma}$  напряженности магнитного поля рассеяния (ЛОН) восьми двутавровых балок за 36 суток эксплуатации. Цифры 1-3 обозначают этапы измерения напряженности  $H_{0\sigma}$  магнитного поля рассеяния ЛОН каждой исследуемой балки. Первый этап регистрировался через 0,5 часа после локального намагничивания (интенсивность движения «нулевая»); второй этап — через 2 часа (интенсивность движения возрастает); третий этап — через 36 суток. Высота столбца диаграммы численно равна относительному изменению параметра  $\delta H_{0\sigma}$  напряженности магнитного поля рассеяния локальной остаточной намагниченности, полученного на соответствующем этапе измерения и величине механических напряжений  $\sigma_{\text{раст}}$ , которая была получена по итогам калибровки  $\delta H_{0\sigma}$  на одной из балок. Номера балок на диаграмме (рис. 1) определяются слева направо.



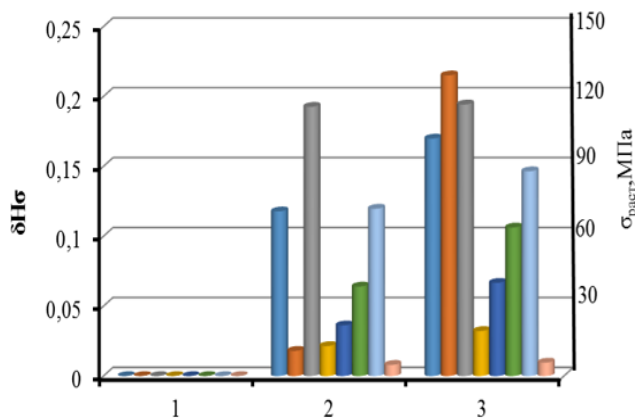


Рис. 1. Диаграмма относительного изменения тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния  $\delta H_{\sigma}$  ЛОН и напряжений  $\sigma_{\text{раст}}$ .

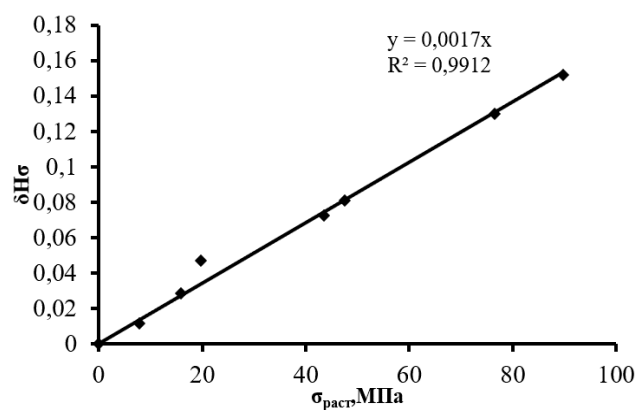


Рис. 2. Зависимость изменения тангенциальной составляющей напряжённости магнитного поля рассеяния  $\delta H_{\sigma}$  от напряжений растяжения  $\sigma_{\text{раст}}$ .

На этапе калибровки была установлена зависимость (рис. 2) относительного изменения  $\delta H_{\sigma} = (H_{0\sigma} - H_{\sigma}) / H_{0\sigma}$  напряженности магнитного поля рассеяния локальной остаточной намагниченности балки под № 2 от напряжений растяжения  $\sigma_{\text{раст}}$ , оцениваемых по результатам измерения её деформации тензометрическим способом.

Результаты оценки максимальных напряжений  $\sigma_{\text{раст}}$ , возникающих в нижних полках исследуемых балок в течение одного месяца, показаны на рис. 1.

Исследование магнитоупругого размагничивания балок автомобильного моста, вызванное динамическим воздействием транспорта, показало, что все балки испытывают разного уровня напряжения; наибольшие динамические нагрузки испытывают балки (1-4, до 125 МПа), расположенные под полосами въезжающего на мост транспорта, и значительно меньшего уровня нагрузки – у балок под съезжающим с эстакады транспортом (5-8, не более 80 МПа).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мосты и трубы. Актуализированная информация СНиП 2.05.03-84 : СП 35.13330.2011 : утв. М-вом регионального развития Рос. Федерации 28.12.10 : введ. в действие с 20.09.11. – Москва : Изд-во ЦПП, 2011. 347 с.
2. Кулак С.М., Новиков В.Ф. Определение механических напряжений в стали методом упругого размагничивания // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. № 7. С. 56–59.
3. Новиков В.Ф., Радченко А.В., Устинов В.П., Мимеев М.С. Контроль магнитоупругим методом напряженно-деформированного состояния стальных металлоконструкций в условиях севера // Академический журнал Западной Сибири. 2014. № 3. С. 140–144.
4. Новиков В.Ф., Бахарев М.С., Сорокина С.В. Неразрушающий контроль снеговой и ветровой нагрузки металлоконструкции в режиме магнитоупругой памяти // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2008. № 3. С. 51–54.

## МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТА КАНАТА НА СПЕКТР ЕГО СВОБОДНЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ

© 2023 г. Ирина Алексеевна Шаропина<sup>1\*</sup>, К. Р. Муратов<sup>1\*\*</sup>, И. С. Бевзюк<sup>1\*\*\*</sup>

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

\* - [sharopinaia@gmail.com](mailto:sharopinaia@gmail.com); \*\* - [muratows@mail.ru](mailto:muratows@mail.ru); \*\*\* - [ira29019@gmail.com](mailto:ira29019@gmail.com)

В работе [1] были представлены результаты анализа влияния изгибной жесткости стальных канатов на спектр их собственных поперечных колебаний. Обоснована принципиальная возможность обнаружения дефектов каната по результатам регистрации этого спектра. Чтобы определить практическую возможность такой процедуры нами были выполнены расчеты влияния дефекта каната на спектр колебаний.

Дифференциальное уравнение, описывающее поперечные колебания каната с учетом его реакции на изгиб и без учета затухания, имеет вид:

$$f \frac{d^2 u}{dx^2} - g \frac{d^4 u}{dx^4} = \frac{d^2 u}{dt^2}. \quad (1)$$

Здесь:  $u$  – поперечное смещение;  $x$  – координата вдоль оси каната;  $t$  – время,  $f = F/\tau$  – отношение силы натяжения  $F$  и массы  $\tau$  одного метра каната;  $g = EI/\tau$  – отношение изгибной жесткости каната  $EI$  и  $\tau$ .

В случае фиксации каната с двух его концов накладывается условие неподвижности концевых точек, что приведет к возникновению стоячих волн, описываемых выражением:

$$u = A \cos(2\pi\nu t) \sin(kx + \varphi), \quad (2)$$

где  $A$  – амплитуда колебаний,  $\nu$  – частота колебаний,  $k$  – волновое число,  $\varphi$  – фаза колебаний при  $x = 0$ .

Как известно, ограничение пространства существования стоячей волны приводит к дискретному набору возможных частот колебаний. В случае однородного каната по всей его длине  $L$  из уравнений (1) и (2) получим набор возможных частот

$$\nu^2 = \frac{f}{4L^2} n^2 + \frac{\pi^2 g}{4L^4} n^4. \quad (3)$$

Здесь  $n$  – номер тона (гармоники).

Чтобы не прибегать к сложному численному моделированию колебаний каната с локализованным дефектом, нами предложена модель, изображенная на рис. 1. Канат слева и справа закреплен в точках с координатами  $-L/2$  и  $+L/2$ , центр дефектного участка протяженностью  $\Delta$  имеет координату  $l$ .

Колебания в каждой их характерных зон каната описываются уравнением (2) со своими значениями амплитуды  $A_i$ , волнового числа  $k_i$  и фазой  $\varphi_i$ . Так как зоны 1 и 3 не имеют повреждения их волновые числа одинаковы  $k_1 = k_3 = k_0$ , в зоне 2  $k_2 = k$ . Частоты колебаний одинаковы. Краевые условия в точках зажима каната и сопряжения характера зон:

$$u_1\left(-\frac{L}{2}\right) = 0; u_3\left(\frac{L}{2}\right) = 0; u_1\left(l - \frac{\Delta}{2}\right) = u_2\left(l - \frac{\Delta}{2}\right); u_2\left(l + \frac{\Delta}{2}\right) = u_3\left(l + \frac{\Delta}{2}\right);$$

$$\frac{du_1}{dx}\left(l - \frac{\Delta}{2}\right) = \frac{du_2}{dx}\left(l - \frac{\Delta}{2}\right); \frac{du_2}{dx}\left(l + \frac{\Delta}{2}\right) = \frac{du_3}{dx}\left(l + \frac{\Delta}{2}\right).$$
(4)

Первые два условия обусловлены зажимом каната, следующие два – его неразрывностью и последние два – отсутствием изломов.

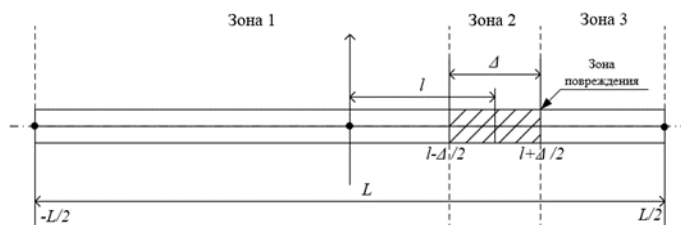


Рис. 1. Модельная схема расположения дефекта на канате.

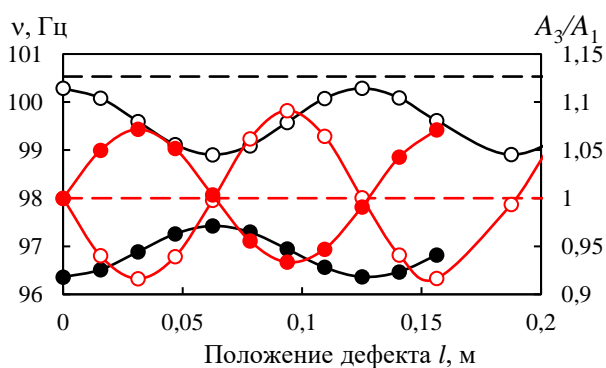


Рис. 2. Влияние положения дефекта на частоту колебаний и соотношение амплитуд первой и третьей зон.

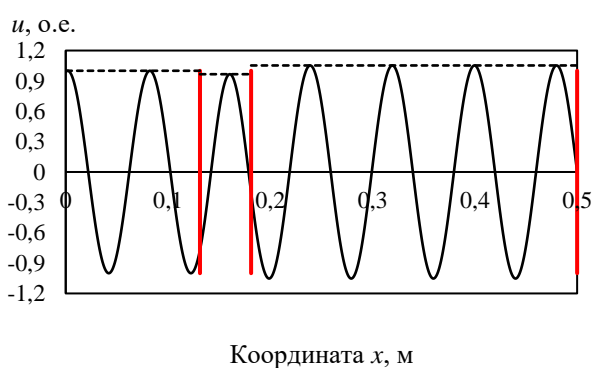


Рис. 3. Характер влияния дефекта каната на распределение амплитуды колебаний.

На рис. 2 показан пример влияния положения дефекта на частоту (черным) и соотношение амплитуд первой и третьей зон (красным). Вычисления выполнены для дефектов протяженностью 5 (пустые маркеры) и 20 (сплошные маркеры) % от длины каната. Пунктирами показаны значения при отсутствии повреждения каната. На рис. 3 представлен характер распределения поперечных смещений каната в трех характерных зонах. Полученные результаты подтверждают ранее высказанную идею о возможности контроля состояния каната по результатам регистрации его собственных колебаний.

Авторы благодарят за поддержку данного исследования национальный проект «Наука и университеты» Минобрнауки России (FEWN-2021-0012).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Муратов К.Р., Новиков В.Ф., Кулак С.М. и др. Учет жесткости стальных канатов при оценке силы их натяжения по результатам измерения частоты собственных колебаний // Дефектоскопия. 2023. № 2. С. 16–23.

# ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КРИВОЙ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА

© 2023 г. Роман Александрович Соколов<sup>1\*</sup>, К. Р. Муратов<sup>1\*\*</sup>, В. Ф. Новиков<sup>1\*\*\*</sup>

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

\* - [falcon.rs@mail.ru](mailto:falcon.rs@mail.ru); \*\* - [muratovkr@tyuiu.ru](mailto:muratovkr@tyuiu.ru); \*\*\* - [vitaly.nowikov2017@yandex.ru](mailto:vitaly.nowikov2017@yandex.ru)

В практике использования магнитных характеристик стали в качестве диагностических параметров известны устоявшиеся методики и методы [1]. Применение магнитных параметров для определения механических свойств стали и проведения структурного анализа является достаточно изученным направлением. Однако однозначно говорить о решении задач контроля по магнитным характеристикам на сегодняшний день не представляется возможным. В большинстве случаев обнаруженные зависимости несут высокую достоверность и информативность лишь для узкого круга материалов.

Исходя из данного положения в настоящей работе проведен поиск универсального критерия или параметра, основанного на магнитных свойствах вещества, применимого для широкого спектра марок сталей и их состояния.

В работе рассматриваются результаты лабораторных исследований конструкционных сталей. Для анализа использованы составляющие Фурье-спектра петель магнитного гистерезиса, представленных в псевдореальной форме [2]. При помощи метода учёта группового аргумента [3, 4] определен параметр, включающий в себя комплекс гармонических составляющих, который имеет удовлетворительную корреляцию с твердостью материала (рис. 1) и позволяет найти оптимальный комплексный параметр.

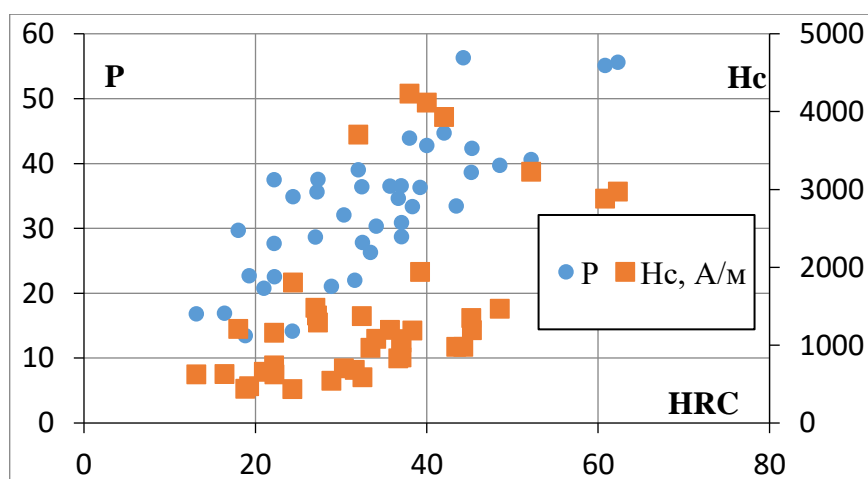


Рис. 1. Связь коэрцитивной силы, комплексного параметра и твердости материала для различных марок стали.

Выводы:

1. Согласно полученным данным установлено, что для твердости и комплексного параметра, полученного при помощи метода учета группового аргумента на основе

гармонических составляющих, наблюдается удовлетворительная единая корреляция с твердостью для широкого перечня сталей.

2. Выпадение некоторых точек из общей зависимости для исследуемых сталей происходит при различных температурных обработках и связана с особенностями протекающих при этих температурах процессов изменения структурно-фазового состава.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Ничипурук А.П., Сташков А.Н., Костин В.Н. [и др.] Коэрцитиметрический контроль качества стальных деталей. Уральская школа коэрцитиметрии // В мире неразрушающего контроля. 2015. Т. 18. № 4. С. 9–13.*
2. *Sokolov R., Novikov V., Muratov K. Application of magnetic hysteresis loop for analysis of corrosion properties of steel // AIP Conference Proceedings. V. 2315. P. 060017. DOI: 10.1063/5.0032347.*
3. *Баласанян С.Ш., Геворгян Э.М. Сравнительный анализ методов регрессии и метода группового учета аргументов при моделировании процессов переработки полезных ископаемых // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 4. С. 23–34.*
4. *Аузин А.А., Муравина О.М. Статистический анализ данных каротажа методом группового учета аргументов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2010. № 2. С. 219–224.*

## ФОРМИРОВАНИЕ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ОБРАЗОВ НАПЛАВЛЕННОГО СЛОЯ В ПРОЦЕССЕ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ

© 2023 г. Дмитрий Олегович Кузиванов<sup>1\*</sup>, А. В. Федоров<sup>1\*\*</sup>, И. Ю. Кинжагулов<sup>1\*\*\*</sup>,  
К. А. Степанова<sup>1\*\*\*\*</sup>

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

\* - kuzivanovdmitry@gmail.com; \*\* - afedor62@yandex.ru; \*\*\* - kinzhiki@mail.ru;

\*\*\*\* - ledy.xs93@yandex.ru

Одним из перспективных направлений развития современной промышленности являются аддитивные технологии, в том числе процесс прямого лазерного выращивания (ПЛВ), в основу которого положен принцип управляемого формирования изделия за счет локального ввода материала по заданным координатам. Эта технология позволяет расширить границы возможностей современного производства, создавать принципиально новые детали сложной геометрии, одновременно снижая как временные, так и материальные затраты на их производство [1, 2]. Специфика процесса получения изделий с помощью данной технологии приводит к наличию в материале (детали) различных структурных неоднородностей [3, 4]. В работе проведено исследование зависимостей изменения параметров сигналов акустической эмиссии (АЭ) от процессов, происходящих в материале в процессе ПЛВ, которое может обеспечить возможность выявления трещинообразования в изделиях в процессе их прямого лазерного выращивания.

Целью экспериментальных исследований было формирование акустико-эмиссионных образов наплавленного слоя в процессе ПЛВ изделий, позволяющих определить по сигналам АЭ процессы, происходящие в ходе выращивания изделия. Для проведения исследований был сформирован экспериментальный стенд, состоящий из роботизированной установки прямого лазерного выращивания «ИЛИСТ-Л», акустико-эмиссионной системы СЦАД 16.10 и четырех преобразователей АЭ с полосой пропускания 100–700 кГц. В ходе экспериментальной части исследования проводилось прямое лазерное выращивание 5 образцов из материала ЭП648 с различными значениями мощности излучения лазера, причем изготовление одного из образцов заведомо влекло за собой образование в нем трещин из-за неверно выбранных параметров наплавки. После изготовления образцов была проведена их металлография, подтверждающая наличие дефектов в одном из образцов. Данные, полученные при постобработке сигналов АЭ, были также сопоставлены с результатами металлографии.

На основе результатов, полученных в ходе экспериментальных исследований, были сформированы АЭ образы таких этапов ПЛВ как подача порошка при выращивании, механические шумы оборудования при выращивании, образование пор в изделии при выращивании и образование трещин в изделии при выращивании. Полученные результаты могут

быть положены в основу разработки методики акустико-эмиссионного контроля процесса качества изделий в процессе ПЛВ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Туричин Г.А., Земляков Е.В., Климова О.Г., Бабкин К.Д., Шамрай Ф.А., Колодяжный Д.Ю. Прямое лазерное выращивание — перспективная аддитивная технология для авиадвигателестроения // Сварка и Диагностика. 2015. № 3. С. 54–57.
2. Cotteleer M., Joyce J. 3D Opportunity Additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth // Deloitte review issue. 2014. V. 14. P. 9.
3. Вильданов А.М., Бабкин К.Д., Земляков Е.В., Гущина М.О. Влияние осцилляции лазерного излучения на качество поверхности изделий при прямом лазерном выращивании // Фотоника. 2019. Т. 13. № 6. С. 518–523.
4. Хакимов А.М., Жаткин С.С., Никитин К.В., Никитин В.И., Деев В.Б. Влияние технологии прямого лазерного выращивания на структуру и свойства жаропрочного никелевого сплава системы Ni-Cr-W-Mo // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2022. Т. 28. № 2. С. 60–70.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СФЕРОПЛАСТИКОВ

© 2023 г. Данил Романович Фирюлин<sup>1\*</sup>, И. Ю. Кинжагулов<sup>1\*\*</sup>

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

\* - danil.firyulin18@mail.ru; \*\* - kinzhiki@mail.ru

При производстве современных глубоководных аппаратов особенно остро поднимается вопрос об использовании материалов, придающих аппаратам свойство дополнительной плавучести. На данный момент практически всегда применяют материал сферопластик. Сферопластик представляет собой полимерный композиционный материал на основе полимерных связующих, основным наполнителем которого являются полые микросферы [1]. Сферопластик активно применяют в судостроении, где его используют в качестве элементов дополнительной плавучести глубоководных средств и в качестве заполнителя межбортного пространства лодок для обеспечения непотопляемости [2]. Применение сферопластика в судостроении обусловлено такими характеристиками, как низкая плотность, а также практически нулевое водопоглощение [3]. В процессе эксплуатации на сферопластик действуют циклические механические воздействия, в результате чего в материале происходят деформации и дефектообразование, что приводит к увеличению водопоглощения материала, и сферопластик начинает впитывать воду. Таким образом, актуальной задачей является разработка методики оценки водопоглощения сферопластика. В работе предложено использовать акустические методы контроля для оценки водопоглощения сферопластика. Целью данной работы является исследование изменения акустических свойств сферопластиков в зависимости от водопоглощения материала.

Исследование изменения акустических свойств сферопластиков в зависимости от водопоглощения материала происходило в 4 этапа:

1. Для проведения экспериментальных исследований был подготовлен образец из сферопластика размерами  $40 \times 40 \times 40$  мм;
2. На втором этапе образец подвергался механическим испытаниям при одноосном сжатии до начала трещинообразования. Начало трещинообразования было зафиксировано при напряжении в 140 МПа;
3. На третьем этапе нагруженный образец был помещен в воду на сутки;
4. На четвертом этапе образец был извлечен из воды и высушен в течении 48 часов.

На всех четырех этапах с помощью ультразвукового дефектоскопа УСД-60ФР с преобразователем на 1 МГц регистрировалась скорость распространения продольной ультразвуковой волны. В табл. 1 представлены результаты всех четырех этапов исследования.



Изменение скорости распространения УЗВ, м/с

Скорость УЗВ до проведения испытаний	Скорость УЗВ после нагружения	Скорость УЗВ после 24 часов в воде	Скорость УЗВ после 48 часов просушивания
2620	2572	2599	2577
2627	2574	2600	2572
2622	2567	2601	2576
2627	2572	2602	2573
2629	2570	2600	2572

В результате экспериментальных исследований установлено, что акустические характеристики образца, к которому была приложена нагрузка, соответствующая началу трещинообразования, изменяются при длительном нахождении в воде. Из табл. 1 видно, что скорость УЗВ после нахождения образца в воде увеличивается в среднем на 30 м/с, что говорит о том, что образец впитал в себя некоторое количество жидкости. А после просушивания образца скорость УЗВ выросла практически до показателей, соответствующих образцу до погружения в воду. Также было установлено, что скорость УЗВ в бездефектном образце не изменяется после погружения в воду на 24 часа. Вследствие того, что образец перестает быть бездефектным, вода проникает в трещины материала и он перестает обладать нулевым водопоглощением, что в будущем приведет к его негодности для использования.

В результате исследования установлено, что существует связь между изменением акустических свойств и водопоглощением сферопластика в виде изменения скорости УЗВ. По сравнению с бездефектным образцом, образцу, доведенному до трещинообразования, соответствует повышение скорости УЗВ после погружения в воду, что говорит о том, что образец впитал в себя воду и уже не обладает нулевым водопоглощением.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Федонюк Н.Н., Додонов П.А. Структурная модель деформирования и разрушения гетерогенных материалов типа сферопластика при действии гидростатического давления // Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. № 2. С. 37–51.
2. Лебедев В.Л., Косильников В.Ю., Серый П.В., Трошкин С.Н., Анисимов А.В. Прогнозирование гидростатической прочности сферопластиков. // Вопросы материаловедения. 2021. № 4(108). С. 149–164.
3. Додонов П.А., Федонюк Н.Н. Исследование влияния свойств и состава микросфер на характеристики сферопластика при действии гидростатического давления (моделирование и эксперимент) // Труды Крыловского государственного научного центра. 2022. № 4(402). С. 65–74.

## УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

© 2023 г. Алексей Максимович Шмаков<sup>1\*</sup>, А. В. Федоров<sup>1\*\*</sup>

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

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

В настоящее время при разработке перспективных образцов авиационных комплексов особое внимание уделяется их функциональным возможностям. Для придания изделию определенных физических свойств (повышение износостойкости, твердости, отражательной способности) применяются полимерные композиционные покрытия (ПКП). Образовавшиеся дефекты ПКП в процессе эксплуатации могут развиваться и привести к браку ПКП. Таким образом, неразрушающий контроль качества ПКП является важным и ответственным этапом при их изготовлении и эксплуатации. Для обнаружения расслоений в ПКП используются ультразвуковые, тепловые, электромагнитные и другие методы контроля.

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

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

- обнаружение дефектов в ПКП;
- обнаружение дефектов между ПКП и подложкой;
- контроля общей толщины ПКП;
- контроля толщины слоев ПКП.

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

На образце свободной пленки ПКП была измерена скорость распространения ультразвуковых колебаний в материале ПКП, которая составил 970 м/с. По времени прихода эхо-сигнала от границы раздела между ПКП и подложкой и между слоями ПКП (где возможно) с использованием полученного значения скорости распространения ультразвуковых колебаний в

материале ПКП были измерены толщины ПКП экспериментальных образцов. Результаты измерений, а также относительная погрешность измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты измерений толщин ПКП экспериментальных образцов**

№ образца	Фактическая толщина	Результаты измерений с помощью пьезопреобразователя		Результаты измерений с помощью оптико-акустического преобразователя	
		Толщина	Относительная погрешность	Толщина	Относительная погрешность
	мм	мм	%	мм	%
1	2,000	2,020	1,00	2,003	0,15
2	2,000	1,980	1,00	2,033	1,65
3	2,000	1,940	3,00	2,042	2,10
4	1,600	1,580	1,25	1,603	0,19
5	1,600	1,620	1,25	1,613	0,81
6	1,600	1,700	6,25	1,644	2,75
7	2,500	2,350	6,00	2,491	0,36
8	3,000	2,980	0,66	2,980	0,66

Из результатов измерений толщин ПКП экспериментальных образцов установлено, что толщина покрытий, измеренная с помощью оптико-акустического преобразователя, имеет меньшее отклонение от фактического значения величины, чем толщина покрытий, измеренная с помощью пьезоэлектрического преобразователя. Поэтому для задач толщинометрии эффективнее использовать ультразвуковой метод с оптико-акустической генерацией акустических колебаний.

Таким образом, для контроля качества ПКП предложено использовать ультразвуковой эхо-метод. При проведении экспериментальных исследований установлено, что выбранные методы обеспечивают выявление нарушения однородности структуры между слоями ПКП, ПКП и подложкой. При этом информативными параметрами служат время прихода и амплитуда эхо-сигналов от границы раздела между ПКП и подложкой, донного сигнала от металлической подложки, сигнала от расслоения в ПКП. По времени прихода эхо-сигнала от границы раздела между ПКП и подложкой можно оценивать общую толщину ПКП. Высокая разрешающая способность ультразвукового метода с оптико-акустической генерацией акустических колебаний позволяет также оценивать толщину отдельных слоев ПКП. Данный факт дает основания предполагать, что метод может быть применим для контроля степени адгезии между слоями ПКП.

## ПОВЫШЕНИЕ ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ВОСПРОИЗВОДИМОГО СИГНАЛА В ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

©2023 г. Евгений Иннокентьевич Дьячковский<sup>1\*</sup>, И. Ю. Кинжагулов<sup>1\*\*</sup>,  
З. А. Велеулов<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – Университет ИТМО, 197101 г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А  
\* - oberprocuror1996@gmail.com; \*\* - kinzhiki@mail.ru; \*\*\* - zaveleulov@itmo.ru

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

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

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

Целью данной работы является повышение временного разрешения получаемого сигнала с первичного преобразователя. Работа была выполнена в рамках проектирования и разработки лазерно-ультразвукового дефектоскопа.

В работе рассмотрен лазерно-ультразвуковой метод контроля. Представлены теоретические основы лазерно-ультразвукового метода для оценки скорости распространения ультразвуковых волн в объекте контроля. Представлены предпочтительные решения по управлению лазерным модулем, генерирующим ультразвуковые волны в объекте контроля. Обосновано использование обратной связи с лазерного модуля в виде фотодатчика вместо системы затвора с акустооптическим модулятором для покадровой синхронизации получаемых

данных. Проведен частотный анализ воспроизводимого сигнала, по результатам которого была определена необходимая частота дискретизации аналого-цифрового преобразователя и был определен частотный диапазон первичного преобразователя. Результатом работы является обоснование применения пассивного затвора с интегрированным фотодатчиком в твердотельном лазере вместо активного затвора с акустооптической модуляцией для покадровой синхронизации, что в свою очередь влияет на временное разрешение сигнала.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Клюев В.В.* Неразрушающий контроль. Том 3. Ультразвуковой контроль. М.: Изд-во Машиностроение, 2004. 864 с.
2. *Федоров А.В., Быченко В.А., Беркутов И.В., Алифанова И.Е.* Методика оценки неопределенности измерений механических напряжений ультразвуковым методом с помощью оптико-акустического раздельно-совмещенного преобразователя // *Контроль. Диагностика.* 2021. Т. 24. № 7(277). С. 56–61.
3. *Дьячковский Е.И., Кинжагулов И.Ю., Велеулов З.А.* Разработка лазерно-ультразвукового дефектоскопа // *Приборы.* 2023. № 2(272). С. 11–15.

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩИМИ МЕТОДАМИ

© 2023 г. Алена Александровна Тарасова<sup>1\*</sup>, А. В. Мельникова<sup>1\*\*</sup>,  
К. В. Гоголинский<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – Санкт-Петербургский Горный университет, 199106 г. Санкт-Петербург,  
Васильевский остров, 21 линия, д. 2

\* - aat15s@yandex.ru; \*\* - mlnkval77@gmail.com; \*\*\* - nanoscan@yandex.ru

Исследование проводится в рамках разработки методики технического диагностирования полиэтиленовых (ПЭ) газопроводов и оценки их остаточного ресурса. На серии образцов ПЭ труб с различными сроками эксплуатации выполнены измерения предела текучести неразрушающим методом с применением динамических твердомеров. Для обеспечения достоверности результатов измерений предложено аттестовать стандартный образец ПЭ с известным приписанным значением предела текучести по результатам межлабораторных сличительных испытаний.

Полимерные трубы получили распространение в сфере транспортировки газового топлива еще в 1970-х. Ранее использовались металлические трубопроводы, но по причине их низкой коррозионной стойкости предпочтение было отдано трубам из полимеров. По нормам промышленной безопасности проектный ресурс ПЭ труб должен составлять не более 40 лет [1], поэтому в соответствии с данными требованиями все большее количество газопроводов будет постепенно требовать диагностирования. В процессе эксплуатации материал стареет, поэтому необходимо исследовать пределы его использования путем применения механических методов испытаний, которые могут дать полную информацию о состоянии и остаточном ресурсе ПЭ.

Традиционно оценка механических характеристик ПЭ производится в ходе испытаний на растяжение, которые являются методом разрушающего контроля. Процесс подготовки к испытаниям требует вырезки из трубы образцов, что приводит к приостановке работы трубопровода для выемки участков и к последующему ремонту трубопровода. Сохранению целостности объекта исследования способствует применение методов неразрушающего контроля, особый интерес представляют методы твердометрии.

В предыдущем исследовании [2] был произведен анализ существующих средств и методов контроля механических свойств полимерных труб. Среди представленных образцов были новые трубы, а также трубы, находившиеся в эксплуатации от 25 до 55 лет. В качестве основного параметра, характеризующего механические свойства ПЭ, был выбран предел текучести, определяемый по результатам испытаний на растяжение. После произведенного поиска информации о проводившихся ранее исследованиях, касающихся изучения свойств термопластов, были выбраны несколько методов для последующего проведения эксперимента: методы Либа, Шора и динамического инструментального индентирования (ДИИ) [3]. Выбор этих методов позволил решить задачу безобразцового контроля полимерных трубопроводов. Полученные результаты позволили вычислить коэффициент корреляции

между значениями предела текучести и твердости по всем методам, наилучший результат получен по методу ДИИ – коэффициент корреляции составил 0,98 %. Таким образом, была доказана возможность безобразцового неразрушающего контроля механических свойств полимерных труб методом ДИИ.

Для реализации метода ДИИ применялся твердомер ИСПГ, имеющий следующие характеристики ударного преобразователя: масса ударника 4,8 г, радиус индентора 0,75 мм, максимальная скорость 0,89 м/с, кинетическая энергия удара 1,9 мДж. Главный недостаток ИСПГ – это гравитационный способ разгона ударника, который ограничивает его применение на негоризонтальных поверхностях.

Авторами работы [3] было предложено использовать модифицированные ударные преобразователи по шкалам Либа для реализации метода ДИИ. Модифицированный ударный преобразователь типа D не подходит для проведения измерений на тонкостенных образцах полиэтилена, т.к. индентор обладает большой кинетической энергией удара – 11,5 мДж. Поэтому было предложено изучить возможности применения в рамках поставленной задачи прибора с модифицированным ударным преобразователем Либа С, у которого кинетическая энергия удара составляет 3 мДж. Были проведены испытания сериями по 15 измерений на 8 образцах ПЭ труб с различными сроками эксплуатации с помощью двух приборов: ИСПГ и модифицированного преобразователя Либа. Результаты испытаний на данный момент проходят этап расшифровки.

В дальнейшем необходимо провести валидацию предложенной методики. Для этого необходимо аттестовать стандартный образец (СО) полиэтилена с известным приписанным значением предела текучести. Данную процедуру предлагается выполнить на основе межлабораторной метрологической аттестации [4]. Предварительно планируется организовать самостоятельные исследования на однородность и стабильность материала. После проведения межлабораторной аттестации установленное значение предела текучести СО может использоваться в качестве опорного значения, на основании чего станет возможной метрологическая аттестация средств измерений и методики измерения предела текучести.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. СТО Газпром 2-2.3-707-2013. URL: <https://invest.gazprom.ru/d/textpage/4b/75/06.-sto-gazprom-18000.3-006-2017-esupb.-gazoraspredelitelnye-sistemy.pdf>.
2. Vinogradova A., Gogolinskii K., Umanskii A., Alekhnovich V., Tarasova A., Melnikova A. Method of the Mechanical Properties Evaluation of Polyethylene Gas Pipelines with Portable Hardness Testers // *Inventions*. 2022. С. 125. <https://doi.org/10.3390/inventions7040125>.
3. 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. С. 1–10. <https://doi.org/10.3390/inventions7010029>.
4. ГОСТ 8.532-2002. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200030461>.

## РАЗРАБОТКА МАКЕТА ДАТЧИКА ДЛЯ ПРИБОРА ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

© 2023 г. Олег Александрович Колганов<sup>1\*</sup>, А. Е. Хошев<sup>1\*\*</sup>, Р. А. Егоров<sup>1\*\*\*</sup>,  
А. В. Фёдоров<sup>1\*\*\*\*</sup>, Г. Н. Лукьянов<sup>1\*\*\*\*\*</sup>

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

\* - kolganoff2014@yandex.ru; \*\* - severenarwhal@gmail.com; \*\*\* - afedor62@yandex.ru;

\*\*\*\* - roman1465@yandex.ru; \*\*\*\*\* - gen-lukjanow@yandex.ru

В настоящее время в различных отраслях промышленности все более широкое применение находят приборы, реализующие метод динамического индентирования. Физический смысл метода ДИ заключается в нагружении (внедрении), которое осуществляется посредством ударного механического импульса, при котором процесс контактного взаимодействия индентора с материалом является слабо регулируемым, а характер взаимодействия во многом зависит от механических свойств испытываемого материала. Для регистрации параметров движения ударника при контактно ударном взаимодействии (КУВ) используется магнитоиндукционный метод. Применение этого метода регламентируется ГОСТ Р 56474-2015. При КУВ ударника с испытываемым материалом магнит, который входит в состав ударника и жестко закреплен с индентором, наводит сигнал электродвижущей силы (ЭДС), который пропорционален скорости движения ударника на всем временном интервале КУВ.

Основой приборной реализации метода является конструкция датчика для прибора ДИ, который состоит из следующих основных элементов: устройство разгона ударника, система регистрации параметров движения индентора и ударник.

Целью данной работы является разработка макета датчика динамического индентирования на основе магнитоиндукционного метода с дифференциальной катушкой индуктивности.

Применение магнитоиндукционного метода регистрации обусловлено тем, что вызванное изменение магнитного потока в катушке индуктивности при движении магнита формирует сигнал ЭДС, пропорциональный скорости движения индентора на всем временном интервале времени КУВ. В процессе КУВ выделяют фазу активного и пассивного этапов взаимодействия индентора с упругопластическим полупространством. Указанные участки графика зависимости  $V(t)$  несут информативную роль для определения физико-механических характеристик при использовании метода динамического индентирования. Конструктивная особенность применения магнитоиндукционного метода с одной катушкой индуктивности для регистрации движения ударника заключается в обеспечении оптимального расстояния между магнитом, который жестко закреплен с индентором, и верхней частью катушки индуктивности.

Магнитоиндукционный метод с дифференциальной схемой включения катушек индуктивности отличается тем, что катушка индуктивности разделена на два сектора, которые



имеют разнонаправленные витки друг относительно друга. Эти секции катушки индуктивности соединяются последовательно, а на выходах регистрируют возникающее напряжение при внедрении магнита, а именно линия разделения полюсов магнита находится на разделе разнонаправленных секторов катушки.

Преимуществом дифференциальной схемы включения катушки индуктивности касательно применения в первичном преобразователе для датчика ДИ является то, что конструктивно при КУВ магнит должен располагаться внутри катушки. Использование дифференциальной катушки индуктивности также повышает помехоустойчивость благодаря разнонаправленным секторам катушки, которые компенсируют друг друга. При соединении секторов катушки индуктивности с противоположной полярностью последовательно генерируется напряжение, пропорциональное скорости движения магнита.

Таким образом, предложено использование магнитоиндукционного метода с дифференциальным включением катушки индуктивности для регистрации параметров движения ударника. Показана актуальность и применимость решения задачи оптимизации системы регистрации параметров движения ударника. Разработан макет датчика для прибора динамического индентирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Крень А.П., Рабцевич А.В., Зинкевич Н.В.* Моделирование ударного контакта индетора с нежесткими стальными конструкциями при изменении твердости // Известия национальной академии наук Беларуси. Серия Физико-технических наук. 2017. № 4. С. 38–45.
2. ГОСТ Р 56474-2015 Системы космические. Контроль неразрушающий физико-механических свойств материалов и покрытий космической техники методом динамического индентирования. Общие требования.
3. Патент № 20080517 Республика Беларусь, МПК (2006) G01N 3\00, ВУ 5150 U. Магнитоиндукционный датчик для измерения параметров динамического индентирования: №и20080517: дата публикации: 30.04.2009 / *Рудницкий В.А.; Крень А.П.; Мацулевич О.В.*
4. *Колганов О.А., Лукьянов Г.Н., Федоров А.В.* Обоснование выбора метода регистрации параметров движения ударника при динамическом индентировании // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. 2022. Т. 2. С. 54–57.

## РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ РЕГИСТРАЦИИ ДВИЖЕНИЯ УДАРНИКА ПЕРВИЧНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ИНДЕНТИРОВАНИИ

© 2023 г. Александр Евгеньевич Хошев<sup>1\*</sup>, О. А. Колганов<sup>1\*\*</sup>, А. В. Федоров<sup>1\*\*\*</sup>

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

\* - severenarwhal@gmail.com; \*\* - kolganoff2014@yandex.ru; \*\*\* - afedor62@yandex.ru

Контроль качества материалов на различных этапах жизненного цикла продукции является актуальной и востребованной задачей в производстве. В настоящее время безобразцовые методы контроля физических и механические характеристик широко используются для решения задачи неразрушающего контроля (НК) изделий и их комплектующих на этапах производства, испытаний и эксплуатации. Использование этих методов снижает конечную стоимость продукции, повышает эффективность и дает возможность проводить контроль на этапе эксплуатации изделия, в том числе иногда без остановки его работы. Одним из перспективных методов безобразцового контроля механических свойств материалов изделий является метод динамического индентирования (ДИ). Этот метод позволяет проводить безобразцовый контроль твердости и множества механических характеристик материала. Этот метод может быть использован для проведения НК как металлов, так и низкомолекулярных полимеров и композиционных материалов.

В настоящее время, большинство исследований в области метода ДИ сосредоточено на решении вопроса о переходе от значений характеристик контактно-ударного взаимодействия (КУВ) индентора с материалом в процессе испытания к значениям конкретных механических характеристик.

Целью данной работы является разработка компьютерной модели регистрации движения ударника первичным преобразователем датчика динамического индентирования. Для достижения цели были поставлены следующие задачи: разработка конечно-элементной модели первичного преобразователя, разработка конечно-элементной модели КУВ.

Суть метода ДИ и его инструментальной реализации заключается в регистрации параметров движения индентора в процессе КУВ с испытуемым материалом. Регистрация параметров движения индентора осуществляется с помощью первичного преобразователя, принцип работы которого основан на принципе магнитной индукции. В качестве средства регистрации параметров движения индентора используется первичный преобразователь на основе индуктивного метода. Движение индентора вызывает изменение магнитного потока, проходящего через преобразователь во время КУВ. При этом сигнал ЭДС пропорционален скорости движения индентора на всем временном интервале.

Первичный преобразователь динамического индентирования является одним из основных элементов устройства, с помощью которого получают первичную информацию при

проведении КУВ. В настоящее время портативные твердомеры Либа используются для устройств динамического индентирования, предполагающих регистрацию скорости ударника на начальном и конечном этапах КУВ. Метод динамического индентирования основан на непрерывной регистрации параметров движения ударника на всем временном интервале КУВ, поэтому использование твердомеров, предназначенных для измерения твердости по методу Либа, нецелесообразно.

В данной работе рассматривается принцип разработки компьютерной модели движения ударника прибора динамического индентирования при его контактно-ударном взаимодействии с объектом контроля на основе метода конечных элементов. Представлены теоретические основы метода динамического индентирования для оценки механических характеристик материала.

Компьютерное моделирование выполнено при помощи интерфейсов Solid Mechanics, Magnetic Fields и Moving Mesh в программе инженерного анализа Comsol Multiphysics. При моделировании движения ударника за основу был взят первичный преобразователь с дифференциальной схемой включения катушек индуктивности, реализующий магнитоиндукционный метод.

Разработана модель деформации объекта контроля как упругопластичного полупространства, а также модель регистрации движения ударника первичным преобразователем в виде изменения электродвижущей силы, возникающей в катушках индуктивности, на всем временном интервале контактно-ударного взаимодействия.

Проведен анализ зависимости электродвижущей силы от времени как на активном, так и на пассивном этапах контактно-ударного взаимодействия ударника с объектом контроля. Оценена возможность дальнейшей интеграции двух моделей для разработки единой модели процесса динамического индентирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Крень А.П., Рабцевич А.В., Зинкевич Н.В. Моделирование ударного контакта индетора с нежесткими стальными конструкциями при изменении твердости // Известия национальной академии наук Беларуси. Серия Физико-технических наук. 2017. № 4. С. 38–45.
2. ГОСТ Р 56474-2015 Системы космические. Контроль неразрушающий физико-механических свойств материалов и покрытий космической техники методом динамического индентирования. Общие требования.
3. Крень А.П., Рудницкий В.А., Делендик М.Н. Оценка погрешности определения физико-механических характеристик материалов при их контроле методом индентирования // Приборы и методы измерений. 2018. Т. 9. № 3. С. 263–271.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ СТЕРЕОЗРЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЯ ДО ОБЪЕКТОВ В СИСТЕМАХ ВИДЕОИНСПЕКЦИИ

© 2023 г. Вячеслав Владимирович Коняшов<sup>1\*</sup>, А. С. Сергеев<sup>1\*\*</sup>, А. В. Федоров<sup>1\*\*\*</sup>

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

\* - [konyashovslavaa@mail.ru](mailto:konyashovslavaa@mail.ru); \*\* - [alex.sergeev115@yandex.ru](mailto:alex.sergeev115@yandex.ru); \*\*\* - [afedor62@yandex.ru](mailto:afedor62@yandex.ru)

Стереоскопическое зрение (стереозрение) – одно из направлений компьютерного зрения, которое позволяет получить представление о глубине изображения, форме, размерах и расстоянии до объектов с использованием стереоскопических систем [1]. Стереоскопические системы используются при автоматизированном управлении движением роботизированных устройств, в биометрических системах распознавания, в системах видеоинспекции для контроля качества промышленных изделий [2].

Цель исследования – экспериментальная оценка применимости стереозрения для определения расстояния до объектов в системах видеоинспекции для автоматизированного контроля геометрических параметров и обнаружения поверхностных дефектов изделий при их производстве в режиме реального времени. Были решены следующие задачи: выполнены калибровка стереосистемы, ректификация изображений и построена карта глубины изображения объектов, произведена оценка относительной погрешности измерений расстояния до объекта. В работе представлены результаты построения карты глубин изображений объектов с использованием архитектуры стереосистемы на основе двух широкоугольных видеокамер с фиксированной стереобазой и алгоритма обработки, реализованного на языке программирования C++ с подключаемой библиотекой OpenCV [3] определения расстояния до объектов с использованием стереоскопического эффекта.

Для оценки значений внутренних и внешних параметров стереопары выполнена калибровка, которая состояла в регистрации с помощью двух камер стереоскопического изображения тест-объекта в виде шахматной доски, представляющей собой поле, состоящее из 7×5 чередующихся черных и белых квадратов (размер каждого квадрата 28×28 мм). Калибровка включала следующие этапы: регистрация набора изображений тест-объекта; пороговая фильтрация изображения; распознавание тест-объекта по размерам и форме; удаление фона; поиск значений углов тест-объекта; калибровка первой и второй камер; калибровка системы в целом. Для расчета матриц внутренних и внешних значений камер использовался метод «stereoCalibrate()» библиотеки OpenCV [3]. Анализу подвергалась каждая найденная сетка точек изображений. После обработки изображений выполнялось усреднение значений и рассчитывалось среднее квадратичное отклонение (СКО). Критерием успешной калибровки являлось значение СКО не более 0,6. Результаты калибровки стереопары использовались для исправления дисторсии и ректификации изображения [4].

Построение карты глубины производилось по изображениям размером 640×480 пикселей с исправленной дисторсией. Для снижения времени расчета цветное изображение преобразовалось в полутоновое. Для построения карты глубины осуществлялся расчет карты диспаратности методом

«compute (imgLeft, imgRight, disp)» [3]. Данная карта необходима для определения смещения пикселя одного изображения относительно соответствующего ему пикселя другого изображения. Карта глубины представляет собой матрицу размерности исходного изображения, на которой каждому пикселю, вместо цвета, соответствует расстояние до камеры. Для преобразования карты диспаратности в карту глубины использовался метод «disp2Depth (disp, depth, Disp2Depth)» [3]. Для настройки алгоритма расчета карты глубины использовались корректирующие коэффициенты (размер результирующих блоков с расстояниями, смещение и размер диапазона поиска аналогичного пикселя и т.д.) и сглаживающие фильтры результирующей матрицы для устранения шумов. Время, затраченное на расчет карты глубин по изображениям, не превышало 110 мс.

Экспериментальный стенд для оценки точности построения карты глубин изображений объектов включал две широкоугольные цветные видеокамеры с фиксированной стереобазой, компьютер Jetson Nano, двухкоординатный стол с диапазоном перемещений 120×100 мм, оснастку для крепления стереопары и объекта контроля, представляющего собой стойку длиной 300 мм и шириной 30 мм, лазерный дальномер DIMETIX FLS-CH10 (абсолютная погрешность  $\pm 1.0$  мм). Объект контроля устанавливался на двухкоординатном столе на заданном расстоянии от стереопары. При перемещении объекта от матриц камер в диапазоне расстояний (в фокусе стереопары) от 410 мм до 800 мм относительная погрешность измерения расстояния до объекта не превышала 1 %.

В результате проведенных исследований установлено, что стереосистема на основе двух широкоугольных видеокамер с фиксированной стереобазой позволяет определять расстояние до объектов в режиме реального времени. Разработан программный модуль на основе библиотек OpenCV, который может быть использован в системах видеоинспекции для определения расстояния до объектов, их геометрических параметров в реальном времени с относительной погрешностью не более 1 %. Эксперимент показал, что стереозрение можно использовать в системах видеоинспекции, где допустима относительная погрешность измерений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шубникова И.С., Палагуца К.А. Анализ способов и алгоритмов определения параметров объекта и расстояния до него по изображению. [Электронный ресурс]. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sposobov-i-algoritmov-opredeleniya-parametrov-obekta-irasstoyaniya-do-nego-po-izobrazheniyu>.
2. Пономарев С.В. Методика сравнения алгоритмов стереозрения при восстановлении трехмерной модели лица человека // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 6(88). С. 40–45.
3. OpenCV modules. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.opencv.org/trunk/>.
4. Пьянков Д.И. Пространственная обработка несинхронизированных видеопоследовательностей на основе ректификации кадров // Программные продукты и системы. 2013. № 1. С. 61–66.

# РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДВИЖЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ УСТАНОВКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

© 2023 г. Валерий Валерьевич Малый<sup>1\*</sup>, А. С. Костюхин<sup>1\*\*</sup>, А. В. Федоров<sup>1\*\*\*</sup>,  
И. Ю. Кинжагулов<sup>1\*\*\*\*</sup>

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

\* - [banqvalera@mail.ru](mailto:banqvalera@mail.ru); \*\* - [nox9999@yandex.ru](mailto:nox9999@yandex.ru); \*\*\* - [afedor62@yandex.ru](mailto:afedor62@yandex.ru);

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

Целью работы является повышение вероятности обнаружения дефектов типа «неспай» и «непропай» паяных соединений теплообменных аппаратов за счет введения обратной связи между ультразвуковым сигналом от конструктивных элементов и параметрами сканирования.

Теплообменные аппараты (ТА) представляют собой геометрически сложную конструкцию со множеством различных внутренних полостей, что, в свою очередь, обуславливает сложность технологии пайки, связанную с нанесением припоя и обеспечением стабильности величины гарантированного зазора между сопрягаемыми элементами. Наиболее остро стоит вопрос качества паяных соединений (ПС), так как из-за особенностей режимов работы ТА, а также из-за высоких нагрузок при эксплуатации, дефект в паяном соединении может привести к выходу дорогостоящего ТА из строя, который по стоимости разработки и производства составляет 20-40 % стоимости изделия [1].

Объект контроля (ОК) имеет сложную оребренную внутреннюю структуру, представляющую собой две пластины из разных металлов с фрезерованными на одной из них канавками. Ребра одной пластины соединяются с другой посредством припоя. Внутренняя структура ОК представлена на рис. 1:

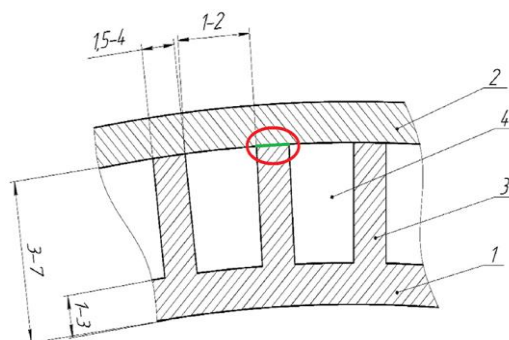


Рис. 1. Внутренняя структура ПС ТА.

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

В настоящее время существуют методики НК, позволяющие выявлять дефекты типа «непропай» и «частичный непропай» [2, 3]. Анализ данных работ показал, что ультразвуковой неразрушающий контроль является одним из наиболее перспективных видов контроля качества ПС ТА.

Реализация схем сканирования ультразвуковым методом ввиду сложности внутренней оребренной структуры ОК накладывает значительные ограничения на скорость и точность

результатов ручного контроля. Проведение сплошного ручного ультразвукового контроля ТА крайне трудоемко, что, в свою очередь, повышает вероятность ошибки оператора при проведении и анализе результатов сканирования, а также накладывает значительные ограничения на скорость сканирования. Повышение оперативности и достоверности результатов контроля возможно за счет автоматизации процесса сканирования, что позволит протоколировать результаты контроля по удобной для интерпретации форме (В-скан, С-скан). Проведение автоматизированных измерений с точки зрения механики заключается в перемещении преобразователя по поверхности объекта контроля с постоянной скоростью по заданной траектории. Поскольку для ввода ультразвуковых волн в ОК используется иммерсионная жидкость, требуется соблюдать постоянный по величине зазор между ПЭП и поверхностью ОК, что позволит стабилизировать акустический контакт.

Для этого необходимо разработать алгоритм движения измерительного модуля автоматизированной установки неразрушающего контроля с обратной связью, основанной на измеренной при сканировании амплитуде сигнала от конструктивных элементов внутренней структуры теплообменного аппарата.

Проведен анализ методов и средств ультразвуковой дефектоскопии в части их применимости для выявления дефектов типа «неспай» и «непропай». Поскольку реализация схем контроля ТА требует значительных временных затрат при ручном сканировании, для повышения скорости и достоверности результатов предлагается автоматизировать процесс контроля. В результате анализа существующих автоматизированных установок были определены основные принципы для автоматизации технологии контроля, а также определены требования к алгоритму движения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 24715-81. Соединения паянные. Методы контроля качества: утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 29 апреля 1981 г. N 2182: дата введения 1983-01-01. М.: Издательство стандартов, 1981. 11 с.
2. *Кинжагулов И.Ю.* Модель термооптического возбуждения ультразвуковых волн в паяных тонкостенных изделиях // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54. № 7. С. 39–44.
3. *Сергеев Д.С., Астрединова Н.В.* Методика контроля качества паяных соединений камер ЖРД с применением метода лазерно-ультразвуковой диагностики // Сборник трудов II Всероссийского конгресса молодых ученых. СПб: Изд-во НИУ ИТМО, 2013. С. 67.

## КОНТРОЛЬ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СПЕЦИАЛЬНЫХ ТРУБАХ В ПРОЦЕССЕ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

© 2023 г. Ирина Евгеньевна Алифанова<sup>1\*</sup>, А. В. Федоров<sup>1,2\*\*</sup>, В. А. Быченко<sup>1,2\*\*\*</sup>,  
И. В. Беркутов<sup>1,2\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – Университет ИТМО, 197046 г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49

<sup>2</sup> – Учреждение науки ИКЦ СЭКТ, 197342 г. Санкт-Петербург,

ул. Матроса Железняка, д. 57

\* - [sherbairina@mail.ru](mailto:sherbairina@mail.ru); \*\* - [avfedorov@itmo.ru](mailto:avfedorov@itmo.ru);

\*\*\* - [bychenok-vladimr@mail.ru](mailto:bychenok-vladimr@mail.ru); \*\*\*\* - [bychenok-vladimr@mail.ru](mailto:bychenok-vladimr@mail.ru)

Контроль остаточных напряжений в ответственных узлах дорогостоящих изделий из специальных материалов в судостроении, авиастроении, ракетостроении и в других областях промышленности является актуальным, так как превышение предельного уровня остаточных напряжений может привести не только к недопустимой деформации, но и к разрушению изделий [1 – 7].

Изготовление специальных труб – сложный технологический процесс, включающий такие технологические операции, как ковка, центробежное литье, мехобработка, термообработка, правка и др. [8 – 10]. Каждая технологическая операция вносит свой вклад в напряженно-деформированное состояние готового изделия, приводя в конечном итоге к недопустимой деформации специальных труб, отклонению их от прямолинейности. Контроль остаточных напряжений в материале специальных труб после проведения разных технологических операций может способствовать анализу причин возникновения остаточных напряжений в готовом изделии и, возможно, корректировке технологического процесса их производства. Кроме того, применение методики неразрушающего контроля остаточных напряжений необходимо при планировании и оценке эффективности мероприятий по снижению остаточных напряжений.

В результате проведенных исследований разработана методика ультразвукового контроля остаточных напряжений в специальных трубах, обеспечивающая:

- выявление зон концентраций остаточных напряжений в специальных трубах;
- оценку распределения остаточных напряжений в материале специальных труб по их длине и в отдельных сечениях;
- оценку распределения остаточных напряжений по поверхности и по толщине специальных труб;
- оценку вклада в распределение остаточных напряжений отдельных технологических операций при производстве специальных труб.

Проведена экспериментальная апробация разработанной методики неразрушающего контроля остаточных напряжений в специальных трубах на разных этапах механической обработки специальных труб, до и после автофретирования.



Результаты экспериментальной апробации методики показали, что разработанная методика позволяет оценивать вклад отдельной технологической операции в напряженно-деформированное состояние изделия. Полученные результаты согласуются с анализом причин возникновения остаточных напряжений на разных этапах технологического процесса.

В результате экспериментальной апробации разработанной методики установлена зависимость между результатами измерений остаточных напряжений, действующими в материале специальных труб, и их отклонением от прямолинейности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Биргер И.А.* Остаточные напряжения. Москва: Изд-во Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1963.
2. *Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Хабарова Д.* Релаксация остаточных напряжений и точность трубных металлоизделий // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. 2018. № 3.
3. *Зайдес С.А., Нгуен В.Х.* Влияние остаточных напряжений на изгибную жесткость длинномерных валов // Вестник ИрГТУ. 2015. № 9(104).
4. *Withers P J.* Residual stress and its role in failure // Reports on Progress in Physics. 2007. № 11. P. 27.
5. *Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Хабарова Д.В.* Остаточные напряжения и предельная деформируемость при волочении осесимметричных металлоизделий // Известия ТулГУ. 2015. № 10.
6. *Злыгостев И.В., Кузнецова Е.В., Колмогоров Г.Л.* Влияние остаточных напряжений на точность и прямолинейность осесимметричных заготовок после обработки металлов давлением // Прикладная математика, механика и процессы управления. 2015. № 1. С. 56–60.
7. *Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Полетаева А.Ю.* Деформативность металлов при определении технологических остаточных напряжений в трубах // Вестник ПНИПУ. 2012. № 1. С. 43–50.
8. *Розов Ю.Г.* Новые технологии изготовления прецизионных трубчатых изделий с профилированной внутренней поверхностью // Вестник Херсонского национального технического университета. 2014. № 4(51).
9. *Лавров А.Ф., Яковлев С.С., Драбик А.Н.* Применение процессов ротационной вытяжки для изготовления осесимметричных деталей // Известия ТулГУ. Технические науки. 2008. № 2.
10. Пат. RU 2699199С1 Российская Федерация, МПК F41A 21/00, B23B 39/02 Способ изготовления стволов артиллерийских орудий / *Соколов А.В., Галкин В.В., Наседкин В.В.*; патентообладатель Акционерное общество «Завод № 9» (АО «Завод № 9»). – № 2018131039; заявл. 29.08.2018; приоритет 29.08.2018; опублик. 03.09.2019 Бюл. № 25. 13 с.

## ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ СПЛАВЛЕНИЕМ

© 2023 г. Алексей Сергеевич Сергеев<sup>1\*</sup>, В. В. Коняшов<sup>1\*\*</sup>, А. В. Федоров<sup>1\*\*\*</sup>

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

\* - alex.sergeev115@yandex.ru; \*\* - konyashovslavaa@mail.ru; \*\*\* - afedor62@yandex.ru

Внедрение аддитивных технологий является новым и перспективным направлением развития промышленности Российской Федерации. Селективное лазерное сплавление позволяет получать сложнопрофильные изделия из различных материалов, в том числе и аустенитных никель-хромовых жаропрочных сплавов (таких как Инконель). Обнаружение и идентификация дефектов данных изделий в автоматизированном режиме контроля с применением стандартных алгоритмов приема, обработки и визуализации ультразвукового сигнала затруднен из-за особенностей распространения ультразвуковой волны в изделиях сложной геометрической формы.

Целью исследования является обоснование необходимости разработки алгоритмов и программ для обнаружения и идентификации дефектов при автоматизированном ультразвуковом контроле изделий, получаемых с помощью селективного лазерного спекания.

Селективное лазерное сплавление является сложным технологическим процессом, качество которого зависит от различных факторов. Основными факторами, влияющими на качество изделий, полученных селективно лазерным сплавлением, являются режимы печати (шаг печати, скорость печати, толщина слоя, мощность лазера), а также свойства (химические, физико-механические, теплофизические) исходного материала. Отклонение значений режимных параметров от заданных в процессе спекания приводит к образованию таких дефектов как трещины, пустоты и пористость. Для обнаружения дефектов используют различные методы контроля как разрушающие, так и неразрушающие. В результате анализа применимости различных методов неразрушающего контроля для изделий аддитивного производства [1] установлено, что ультразвуковой метод контроля является наиболее информативным и оперативным методом.

Одним их факторов, влияющих на автоматизацию ультразвукового метода контроля изделий, получаемых селективным лазерным сплавлением, может выступать их сложная геометрическая форма, которая существенным образом отражается на траектории движения первичного преобразователя (датчика) относительно объекта контроля, что в свою очередь повышает требования к управляющей программе. Другим фактором является непосредственно сама технология изготовления, которая вносит различные степени затухания и дополнительные источники переотражения ультразвуковых волн. Совместно данные факторы существенным

образом затрудняют обработку и интерпретацию полученных ультразвуковых сигналов.

Таким образом, создание систем автоматизированного ультразвукового контроля изделий, полученных селективным лазерным сплавлением, требует разработки математических моделей, алгоритмического и программно-технического обеспечения обработки результатов регистрации ультразвуковых сигналов.

В результате исследования установлено, что создание и внедрение систем автоматизированного ультразвукового контроля изделий, полученных селективным лазерным сплавлением, осложняется из-за их сложной геометрической формы и технологии изготовления, что затрудняет получение, обработку и визуализацию полезного ультразвукового сигнала. Необходимо разрабатывать математические модели, алгоритмическое и программно-техническое обеспечение обработки и визуализации ультразвуковых сигналов при автоматизированном контроле, что повысит вероятность обнаружения дефектов в изделиях аддитивного производства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аддитивные технологии: настоящее и будущее – URL: <http://www.spsl.nsc.ru/FullText/konfe/ADMT-2017.pdf>.

# ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ С РАЗЛИЧНЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ СВОЙСТВАМИ НА ПРИМЕРЕ ENP ПОКРЫТИЙ

© 2023 г. Варвара Владимировна Алехнович<sup>1\*</sup>, К. В. Гоголинский<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup> – Санкт-Петербургский Горный университет, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д.2

\* - [varvara.alekhnovich@gmail.com](mailto:varvara.alekhnovich@gmail.com); \*\* - [nanoscan@yandex.ru](mailto:nanoscan@yandex.ru)

Приведены результаты измерений толщины и твердости защитных никель-фосфорных покрытий шаровых пробок. Целью работы является анализ методов входного контроля свойств ENP покрытий, включая их толщину и механические свойства. Результатом работы является вывод о том, что для проведения входного контроля покрытий шаровых пробок необходимо учитывать электромагнитные свойства покрытий, зависящие от соблюдения технологического процесса при их изготовлении.

Разнообразная запорная арматура, в частности, шаровые краны, должна обеспечивать требуемую герметичность затвора, исключение недопустимых соударений привода крана с ограничителями хода при открытии и закрытии и т.д. [1]. В производстве широко используются металлические покрытия с целью защиты стальной шаровой задвижки от агрессивной среды. Покрытия из сплава никель-фосфор (Ni-P), также называемые в литературе Electroless Nickel-Phosphorus (ENP), нанесенные на стальные поверхности, обеспечивают высокую степень защиты от коррозии [2]. Для данных покрытий элементов шаровых кранов установлены требования по толщине и твердости покрытия [3, 4]. В [3] показано, что пробка и седла должны иметь износостойкое покрытие, нанесенное негалваническим способом, толщиной от 150 до 500 мкм. В [4] указано, что толщина износостойкого покрытия должна составлять не менее 25 мкм для неагрессивной среды и 75 мкм – для агрессивной среды. Твердость покрытия должна составлять не ниже 900 HV [3] или 1100 HV [4].

Особенностью ENP покрытий является то, что их электромагнитные свойства (намагниченность насыщения, магнитная проницаемость, остаточная намагниченность, прямоугольность петли гистерезиса и коэрцитивная сила) и физико-механические свойства (микротвердость, пластичность, хрупкость) зависят от химического состава покрытия и технологических режимов при их нанесении [5].

Результаты измерений средств измерений толщины покрытий, основанных на магнитоиндукционном и вихретоковом методах, зависят от нескольких групп параметров: электрофизических (удельной электропроводности материалов покрытия  $\sigma_{п}$  и основания  $\sigma_{осн}$ , а также комплексной относительной магнитной проницаемости материала основания  $\bar{\mu}_{осн}$ ) и геометрических (толщины покрытия, шероховатости, радиуса кривизны поверхности и др.) [6-7].

Классические методы определения основных механических параметров твердых тел на основе экспериментальной зависимости «напряжение – деформация» не применимы для

покрытий и упрочненных приповерхностных слоев, т.к. требуют изготовления специальных образцов для проведения испытаний. В связи с этим, в данной работе для измерения механических свойств покрытий использовались твердомеры различных типов.

Контроль покрытий шаровых задвижек проводился средствами измерений утвержденного типа: толщиномер защитных покрытий Константа Кбц с магнитоиндукционным и вихретоковым преобразователями, микротвердомер ПМТ-3М, а также аттестованной методикой измерения толщины покрытия методом шарового истирания.

Было исследовано два образца шаровых задвижек с ENP покрытием. В качестве опорного метода для измерения толщины покрытия был выбран метод шарового истирания [8].

По результатам измерений тремя методами (магнитоиндукционным, вихретоковым и шарового истирания) можно сказать, что значения толщин покрытий, полученных при помощи вихретокового фазового и магнитоиндукционного преобразователей, кардинально отличаются. На результаты, получаемые вихретоковым методом, оказывают непосредственное воздействие изменения электропроводности, в то время как такие изменения практически не играют никакой роли при использовании магнитоиндукционного метода. При проведении измерений толщины ENP покрытия магнитоиндукционным методом главной проблемой является то, что после термообработки ENP покрытие приобретает ферромагнитные свойства, а именно намагниченность насыщения, магнитную проницаемость, остаточную намагниченность, схожие по свойствам с основанием, которые приводят к недопустимому искажению показаний средств измерений, реализующих магнитоиндукционный метод. Результаты измерения твердости выявили взаимосвязь между магнитными и механическими свойствами ENP покрытий.

Выявлено, что применение портативных серийно производимых толщиномеров, даже являющихся средствами измерений утвержденного типа и прошедших поверку, не гарантирует получения достоверных результатов измерений толщины покрытий. Это связано с критическим изменением электромагнитных и механических свойств таких покрытий в зависимости от их химического состава и технологии изготовления и влиянием этих свойств на показания приборов. Магнитоиндукционные толщиномеры обладают требуемой погрешностью, однако их применение затруднено тем, что ферромагнитные свойства покрытия не позволяют их применять в данной задаче. Перспективным является применение индукционного толщиномера с подмагничиванием [9].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пиксайкин Р.В., Степаненко О.А. Контроль утечки газа и жидкостей в шаровых кранах магистральных трубопроводов // Сварка и диагностика. 2012. № 3. С. 51–52.
2. Singh D.D.N., Ghosh R. Electroless nickel–phosphorus coatings to protect steel reinforcement bars from chloride induced corrosion // Surface and Coatings Technology. 2006. V. 201. Iss. 1–2. P. 90–101.

3. МУ.10.36 ООО «Иркутская нефтяная компания» «Единые технические требования на поставку кранов шаровых», с. 15, п. 5.10-5.12, Иркутск, 2019.
4. СТО Газпром 2-4.1-1108-2017 Арматура трубопроводная. Краны шаровые специальные. Общие технические условия.
5. Гамбург Ю.Д. Химическое никелирование (получение никель-фосфорных покрытий путем электрокаталитического восстановления гипофосфитом). М.: Изд-во РАН. 2020. 82 с.
6. Сясько В.А. Измерение толщины напыляемых никелевых покрытий на крупногабаритных чугунных изделиях. // Записки Горного института. 2016. V. 221. P. 712. <https://doi.org/10.18454/pmi.2016.5.712>.
7. Сясько В.А., Голубев С.С., Смородинский Я.Г., Потапов А.И., Соломенчук П.В., Смирнова Н.И. Измерение электромагнитных параметров мер толщины металлических покрытий. // Дефектоскопия. 2018. № 10. С. 25–36. DOI: 10.1134/S0130308218100044.
8. Гоголинский К.В., Ивкин А.Е., Алехнович В.В., Васильев А.Ю., Тюрнина А.Е., Васильев А.С. Оценка показателей точности определения толщины покрытий методом шарового истирания // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 7. С. 39–44.
9. Syasko V., Solomenchuk P., Ivkin A., Vasilev A. Thickness inspection of magnetic nickel coatings on ball valve mechanisms // BINDT NDT 2021 Webinar Week URL: <https://www.bindt.org/events/ndt-2021-webinar-week/abstract-2a5/>.

## НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ГРАФИТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ТОРЦОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ

© 2023 г. Кирилл Владимирович Захаров<sup>1\*</sup>, А. Д. Фокина<sup>2</sup>, В. А. Захаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – ИСМАН им. А.Г. Мержанова РАН, 142432 Московская область, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 8

<sup>2</sup> – РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 119991, г. Москва, Ленинский просп., д. 65.

\* - [isman@ism.ac.ru](mailto:isman@ism.ac.ru)

Детали и изделия на основе терморасширенного графита (ТРГ) используются в качестве уплотнительного материала и элементов технических устройств на объектах нефтегазового комплекса при криогенных или повышенных температурах и высоком давлении. При этом детали, содержащие углеродный компонент ниже уровня 97 %, являются низкокачественными, а их использование чревато разрушающими воздействиями на оборудование, недостаточной герметизацией. Степень чистоты графита обуславливает серьезность дальнейших проблем и рисков их появления. По данным Rus-KitNanyangSealingMaterials в Китае есть предприятия, производящие уплотнительные изделия из ТРГ с содержанием углерода ниже 90 %. Потребителям проверить заявленный процент содержания углерода без наличия специальной лаборатории не представляется возможным. Российский стандарт ГОСТ 34708 указывает массовую долю углерода для ТРГ первого класса чистоты (не менее 99,8 %).

Объектами исследований и контроля являлись уплотнительные кольца торцовых уплотнений и листовой материал отечественных и зарубежных производителей ТРГ.

С целью проверки соответствия качества продукции установленным требованиям и предупреждения запуска в производство или эксплуатацию несоответствующей продукции необходимо проводить ее верификацию в соответствии с требованиями ГОСТ 24297, т.е. уплотнительные материалы на основе терморасширенного графита должны проходить входной контроль, который включает в себя:

- проверку наличия сертификата или паспорта качества продукции, полноты приведенных в нем данных и соответствия этих данных требованиям стандарта, технических условий, проектной или конструкторской документации;
- проверку наличия товарного знака, заводской маркировки и соответствия ее сертификатным или паспортным данным;
- осмотр конструктивных элементов для выявления поверхностных дефектов и повреждений, регламентированных техническими условиями и стандартами.

В данной работе для неразрушающего контроля использовался комбинированный подход, позволяющий проводить оценку состояния поверхности и качества деталей и элементов технических устройств из ТРГ:

- анализ нормативно-технической и эксплуатационной документации;

- визуально-измерительный контроль (ВИК) и оптический контроль (ОК);
- контроль поверхности цифровым микроскопом (макроанализ);
- вихретоковый контроль (ВК).

Предварительные исследования применения вихревых токов (рис. 1) показали целесообразность применения данного метода для контроля графитовых деталей и элементов технических устройств. Замеры характеристик ВК объектов разных производителей показали их неравномерность и отличия, что может быть связано с различной плотностью ТРГ или изменением электропроводности, что требует дополнительных исследований.

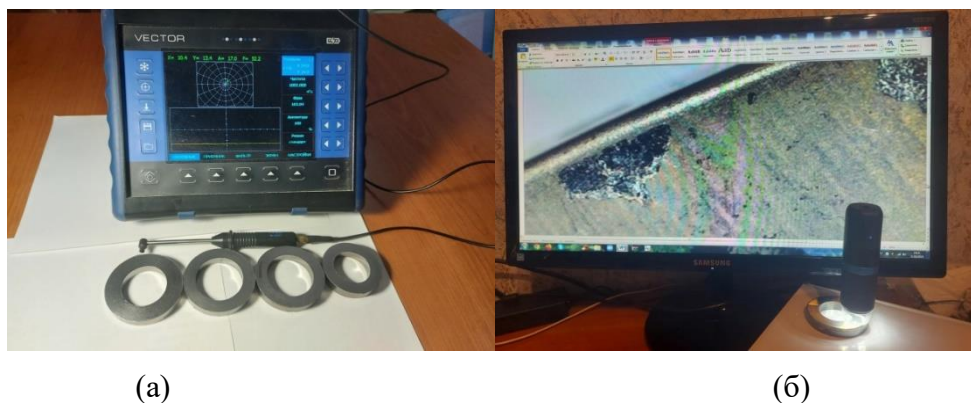


Рис. 1. Контроль поверхности ТРГ-колец вихретоковым дефектоскопом (а) и цифровым микроскопом (б).

Цифровой микроскоп имеет встроенную онлайн-систему, которая обеспечивает вывод снимков на монитор ПК или доступ к простым в использовании инструментам мониторинга с мобильных устройств iOS или Android.

Дефектоскоп позволяет исследовать металлопродукцию, материалы из углерода и композиты на наличие дефектов типа поверхностных и подповерхностных трещин, нарушений сплошности и однородности.

Таким образом, современные информационные технологии позволяют использовать комплексный контроль, включающий анализ нормативно-технической документации, визуально-измерительный контроль, макроанализ структуры (контроль поверхности деталей цифровым микроскопом) и вихретоковый контроль для выявления контрафактной продукции и дефектов макростроения графитовых деталей и элементов технических устройств, как на стадиях производственного цикла, так и в процессе эксплуатации на опасных производственных объектах.



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВС-СПЛАВА НЕРАЗРУШАЮЩИМ МЕТОДОМ

© 2023 г. Кирилл Владимирович Захаров<sup>1\*</sup>, Д. Е. Андреев<sup>1</sup>, М. Ю. Ширяева<sup>1</sup>,  
В. А. Захаров<sup>2</sup>, О. Б. Яременко<sup>3\*\*</sup>

<sup>1</sup> – ИСМАН им. А.Г. Мерджанова РАН, 142432 г. Черноголовка, Московская область,  
ул. Академика Осипьяна, д. 8

<sup>2</sup> – РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 119991 г. Москва, Ленинский пр-т, д. 65

<sup>3</sup> – ООО «Оптон Инжиниринг», 115088 г. Москва, ул. Угрешская, д. 2, стр. 53

\* - *isman@ism.ac.ru*; \*\* - *sv@opton.ru*

Изделия из металлов и их сплавов играют важную роль в надежности и долговечности элементов технических устройств. Контроль таких важных эксплуатационных свойств материалов, как прочность, твердость, трещиностойкость, оценка усталостных характеристик и ресурса изделия невозможны без количественной оценки механических свойств этих материалов. Характеристики механических свойств получают с помощью стандартных разрушающих испытаний специально подготовленных образцов на стационарных разрывных машинах или с помощью портативных приборов.

Безобразцовый неразрушающий контроль (НК) применяется для задач, когда испытания на образцах-свидетелях невозможны или нецелесообразны [1]. Одним из таких экспресс-методов неразрушающего контроля является метод инструментального индентирования, вдавливания наконечника (индентора) в исследуемый материал. Суть метода инструментального индентирования заключается в определении зависимости усилия на инденторе (усилия вдавливания) от глубины вдавливания (глубины проникновения индентора в материал) на различных глубинах вдавливания при постепенном возрастании усилия. Глубина отпечатка не превышает 150 мкм, диаметр отпечатка до 0,5 мм, что не нарушает целостности материала конструкции и не меняет его физические свойства. При вдавливании в материал под индентором создаются условия напряжения и соответствующей ему деформации. Это позволяет провести действительно местное измерение реакции материала при деформации в широком диапазоне, по которому составляется диаграмма механических параметров материала – диаграмма «напряжение-деформация».

Длительность одного испытания для получения требуемой характеристики составляет всего 3 - 5 минут и позволяет получить мгновенный результат измерения. Прочность на растяжение и трещиностойкость определяются по специальным оценочным кривым из данных испытания вдавливанием, а остаточное напряжение – из диаграммы зависимости глубины погружения индентора от нагрузки, которая позволяет количественно определить остаточное напряжение материала. Система позволяет проводить испытания на малых участках и площадях, сварных швах и в зоне термического влияния сварного соединения.

Целью настоящего исследования является определение механических характеристик методом инструментального индентирования системой FRONTICS AIS 3000 HD сплава на кобальтовой основе, полученного методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Состав сплава содержит следующие химические элементы: Co, Cr, Ti, W, Mo, C, Al. Количественный состав элементов в сплаве был определен с помощью метода сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионного анализа [2] и аналитической химии, состав приведен в табл. 1. Результаты неразрушающего контроля методом индентирования приведены в табл. 2.

Таблица 1

**Химический состав СВС-сплава (масс. %)**

Co	Cr	Ti	W	Mo	Al	C
баланс	31,2–33,5	4,9–5,1	3,1–3,2	1,8–1,9	3,7–4,1	2,0–2,4

Таблица 2

**Результаты по определению механических характеристик СВС-сплава методом инструментального индентирования системой FRONTICS AIS 3000 HD**

№ теста	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$	Временное сопротивление, $\sigma_b$	Трещиностойкость, $K_{Ic}$
	МПа	МПа	МПа $\times$ м <sup>0,5</sup>
Тест 1	1361,7	1397,3	195,7
Тест 2	1404,5	1466,6	193,4
Тест 3	1354,1	1444,7	163,2
$\Sigma_{cp}$	1373,5	1436,2	184,1

Таким образом, показана возможность достоверной оценки механических характеристик СВС-сплава с помощью метода инструментального индентирования. Системы экспресс-диагностики материалов серии AIS способны найти применение во многих направлениях промышленных и машиностроительных производств, а также в испытательных лабораториях для исследования различных материалов и сплавов, где требуется быстрая оценка механических характеристик на промежуточных этапах производства деталей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Яременко О.Б., Куранов А.Е., Васильцов С.Ю. Инструментальное индентирование как неразрушающий метод оценки механических характеристик конструкционных материалов // Сборник трудов 5-й Международной научно-технической конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение» (ЖивКоМ – 2020), Москва, 27-29 октября, 2020. М: Изд-во ИМАШ РАН, 2020. 282 с.
2. Andreev D.E., Zakharov K.V., Yukhvid V.I. et al. Influence of Ti on the Structure and Phase Composition of CoCrTiWMoCAI Alloys Prepared by Centrifugal SHS // Int. J Self-Propag. High-Temp. Synth. 2022. V. 31. P. 89–94. <https://doi.org/10.3103/S1061386222020029>.

## НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ В СЛАБЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТАХ

© 2023 г. Елизавета Сергеевна Лосева<sup>1\*</sup>, И. Н. Лозовский<sup>2\*\*</sup>, В. А. Сясько<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> – Санкт-Петербургский горный университет, 199106

г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., д. 2

<sup>2</sup> – Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. Шмидта  
Российской академии наук, 108840 г. Москва, г. Троицк, а/я 30

\* - [elizaveta\\_loseva@mail.ru](mailto:elizaveta_loseva@mail.ru); \*\* - [i.n.lozovsky@yandex.ru](mailto:i.n.lozovsky@yandex.ru); \*\*\* - [9334343@gmail.com](mailto:9334343@gmail.com)

Целью данной работы является повышение достоверности сейсмоакустического метода контроля при оценке длины и сплошности свайных фундаментов в слабых водонасыщенных грунтах.

Железобетонные свайные фундаменты используются для передачи действующей нагрузки на нижележащие слои грунта [1]. Наиболее часто используемые типы свайных фундаментов – сваи заводского изготовления, устанавливаемые забивкой или вдавливанием, а также монолитные: сваи с вытеснением грунта, сваи, изготовленные полым шнеком (СФА), буронабивные инъекционные сваи [2, 3] и т.д. Так как бетонная смесь оказывается в скважине до начала своего твердения, она подвержена негативным факторам со стороны грунтового массива, что может привести к возникновению дефектов в теле сваи, таких как шейки, каверны, размытие бетонной смеси, грунтовые включения и т.д. Оценка сплошности подземных железобетонных конструкций осуществляется с использованием методов неразрушающего контроля. Методы неразрушающего контроля основаны на различных физических явлениях, таких как распространение упругих волн или процессы теплопередачи [4]. Наиболее распространенным методом для оценки длины и сплошности свай является сейсмоакустический метод, основанный на анализе распространения упругих волн в теле сваи [5]. Упругие волны возбуждаются ударом молотка по оголовку сваи, распространяются вниз вдоль тела сваи и отражаются от зон изменения акустического импеданса (пята сваи, неоднородности). Ускорение частиц регистрируется как функция времени датчиком, установленным на оголовке сваи. Далее записанные сигналы обрабатываются и подготавливаются к процедуре интерпретации.

Для изучения разрешающей способности метода и его способности локализовать дефекты в теле сваи был устроен экспериментальный полигон, состоящий из десяти опытных свай с дефектами, такими как грунтовое включение и размытие бетонной смеси. Всего было изготовлено десять свай, по три на каждый вид дефекта, и одна свая без дефектов. Длина свай составила 3 метра, диаметр – 450 мм, сваи были изготовлены по технологии полого проходного шнека (СФА). Дефекты были изготовлены из полистирола с размерами 250 мм в диаметре и 100 мм толщиной (размытие бетонной смеси), 100×150×300 мм (грунтовое включение), 100×150×150 мм (грунтовое включение) и располагались в центре тела сваи. Полевые испытания

проводилось через семь дней после изготовления свай, при помощи оборудования Спектр-4.0 (ООО НПП "Интерприбор", г. Челябинск). На полученных в результате обработки сигналах ярко выделяются импульсы на отметках времени 1,5 - 1,7 мс, отвечающие регистрации волн, отраженных от пяты сваи. При этом характерных откликов от установленных в сваях дефектов при проведении стандартного анализа выявлено не было.

Для повышения достоверности интерпретации результатов измерений предлагается анализировать зарегистрированные данные в частотно-временном представлении с использованием комплексного вейвлет-преобразования. Результаты применения комплексного вейвлет-преобразования представляются в виде распределений энергии и фазы вейвлет-коэффициентов [6].

При анализе фазовых вейвлет-спектров сигналов, зарегистрированных на опытном полигоне, были выявлены изменения фазы на отметках времени 0,0 и 1,5 мс, что соответствует входному и отраженному от пяты сваи импульсам. На результатах обследования свай с дефектами смена фазы также наблюдается и на отметке времени 0,75 мс.

Таким образом, для повышения достоверности результатов сейсмоакустических испытаний свай рекомендуется использовать дополнительные инструменты для обработки сигналов. Применение комплексного вейвлет-преобразования (анализ сигнала в частотно-временном представлении) подтвердило возможность выделения первичных информативных параметров (изменение фазы сигнала), позволяющих оценить месторасположение дефектов и длину сваи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. СП 24.13330.2021 СНиП 2.02.03-85 Свайные фундаменты. docs.cntd.ru [Электронный ресурс].
2. *Fleming K., Weltman A., Randolph M., Elson K.* Piling engineering // Taylor & Francis, London. 2008. 408 p.
3. *Vasiliev G.G., Dzhajabov A.A., Leonovich I.A.* Analysis of the causes of engineering structures deformations at gas industry facilities in the permafrost zone // Journal of Mining University. 2021. V. 249. P. 377–385.
4. *Amir J.M.* Pile integrity testing: History, present situation, and future agenda // In Proceeding of 3rd Bolivian International Conference on Deep Foundations, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. 2017. P. 17–32.
5. ASTM D5882–16. Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2016.
6. *Ni S.H., Li J.L., Yang Y.Z., Lai Y.Y.* Applicability of complex wavelet transform to evaluate the integrity of commonly used pile types // Journal of GeoEngineering. 2019. V. 14. No. 1. P. 21–30.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ТРУБ И ЛИСТОВ В ИСПОЛЬЗОВАНИЕ SH И tH ВОЛН

© 2023 г. Людмила Владимировна Волкова<sup>1\*</sup>, А. М. Решетникова<sup>1</sup>, В. А. Макарова<sup>1</sup>,  
Р. Ю. Егоров<sup>1</sup>

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

\* - [ludmila396@rambler.ru](mailto:ludmila396@rambler.ru)

Для листового проката из углеродистых сталей характерна анизотропия механических свойств, которая влияет на свойства материала при производстве изделий, технологические и эксплуатационные характеристики. Акустические методы структуроскопии по скорости ультразвуковых волн широко применяются при оценке напряженно-деформированного состояния, прочностных свойств, текстуры и анизотропии проката. Оценка коэффициента анизотропии акустических свойств тонколистового проката из низкоуглеродистой стали с использованием волн Лэмба составляет согласно исследованиям 0,6-2,7 %, при этом чувствительность к анизотропии свойств в существенной мере определяется частотным диапазоном прозвучивания и толщиной исследуемого листа.

Для оценки анизотропии толстых листов был использован электромагнитно-акустический преобразователь для возбуждения поперечных горизонтально-поляризованных волн, распространяющихся по толщине листа tH волн и пьезопреобразователь для возбуждения поперечных волн с горизонтальной поляризацией, распространяющихся по поверхности листа SH волн.

В процессе измерений преобразователи поворачивались на угол  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  от направления проката с шагом  $10^\circ$ . Принятые сигналы для оценки величины  $\Delta t = t_0 - t_\alpha$  обрабатывались с использованием функции автокорреляции импульсов. Исследования проводились на образцах труб толщиной 8, 12, 16 мм, изготовленных из марки стали Ст3 и 09Г2С.

Результаты экспериментальных исследований (рис. 1) показывают влияние угла поворота преобразователя на скорость поперечной волны в трубах различной толщины, при этом происходит резкое изменение скорости с периодичностью в  $90^\circ$  в одном направлении поляризации.

По результатам исследований получено, что наименьшая разность по скоростям волн наблюдается в трубе с толщиной стенки 12 мм, для tH волны она составила 4 м/с, а для SH волны – 20 м/с. Для трубы с толщиной стенки 8 мм разница в скоростях tH волны составила 30 м/с, для SH волны – 90 м/с, для трубы с толщиной стенки 16 мм разница в скоростях составила 35 м/с и 30 м/с соответственно.

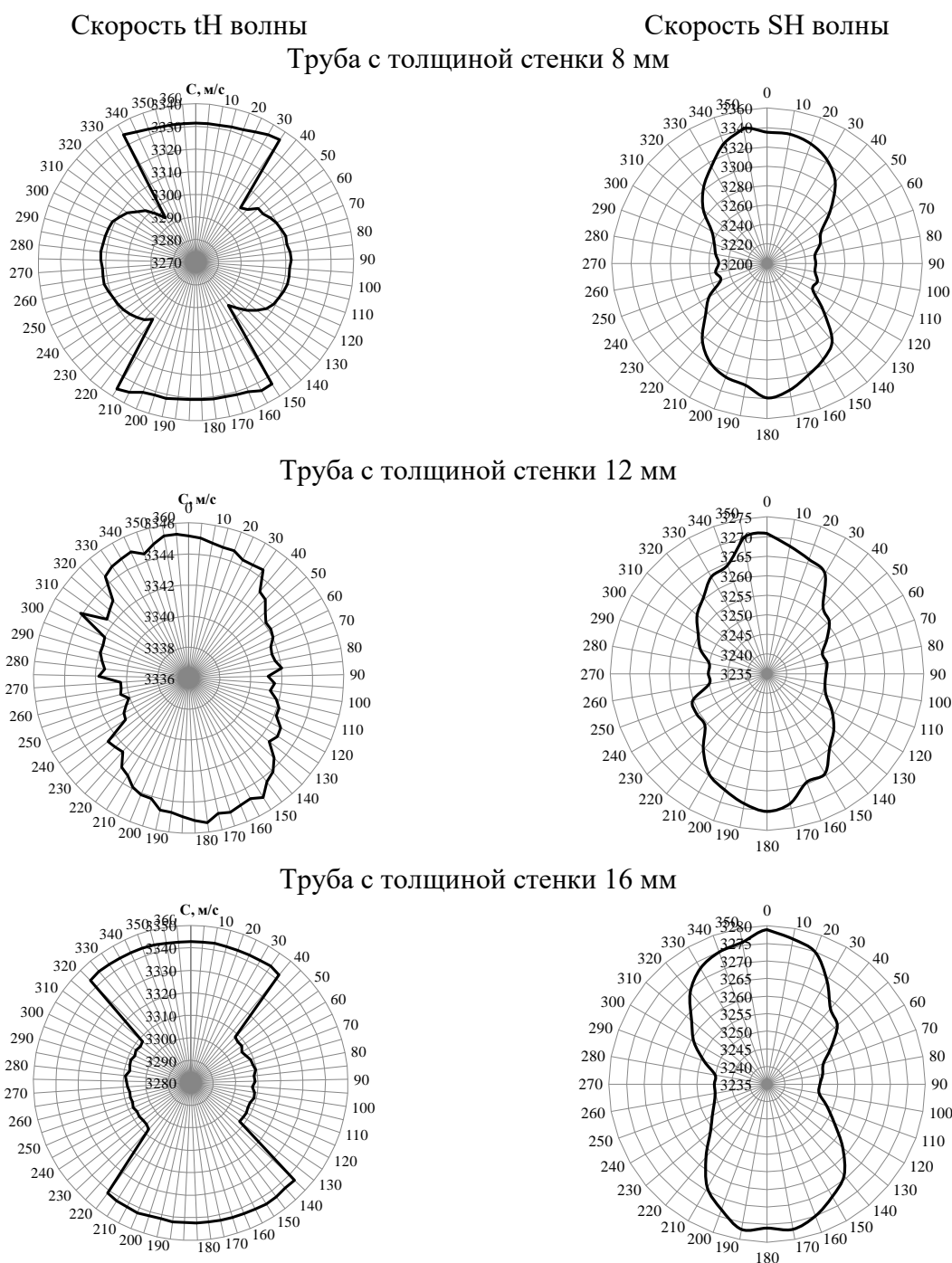


Рис. 1. Графики изменения скоростей двух типов волн в трубах.

Результаты экспериментальных исследований позволят оценить коэффициенты акустической анизотропии трубного проката для дальнейшей оценки напряженно-деформированного состояния.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Murav'eva O.V., Murav'ev V.V. Methodological peculiarities of using SH- and Lamb waves when assessing the anisotropy of properties of flats // Russian journal of nondestructive testing. 2016. V. 52. No. 7. P. 363–369.
2. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Volkova L.V. Influence of the mechanical anisotropy of thin steel sheets on the parameters of Lamb waves // Steel in translation. 2016. V. 46. No. 10. P. 752–756.