

Научное издание

**Современные методы и приборы контроля
качества и диагностики состояния объектов**

Материалы 5-й международной
научно-технической конференции
Могилев, 24–25 сентября 2014 г.

Авторы несут персональную ответственность за содержание докладов

Технический редактор И. В. Брискина

Компьютерная верстка И. В. Брискина

Подписано в печать 03.09.2014 г. Формат 60х84/16. Бумага офсетная.
Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 19,12. Уч.-изд. л. 21,31.
Тираж 130 экз. Заказ № 8.

Издатель:

Государственное учреждение высшего профессионального образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий

№ 1/156 от 24.01.2014.

Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.

Цифровая печать с оригинал-макета заказчика
ИП Войцехович Д.Л., св. № 191347677, выд. Фр. РИК 01.04.10,
г. Минск, ул. Матусевича, 78-191.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ

Государственное научное учреждение
«ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН БЕЛАРУСИ»

БЕЛОРУССКАЯ АССОЦИАЦИЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И
ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

РОССИЙСКОЕ ОБЩЕСТВО ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ
КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

УП «БЕЛГАЗПРОМДИАГНОСТИКА»

Государственное учреждение высшего профессионального образования
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Современные методы и приборы контроля
качества и диагностики состояния объектов**

Материалы 5-й международной
научно-технической конференции
Могилев, 24–25 сентября 2014 г.

*Конференция посвящается памяти директора
Института прикладной физики НАН Беларуси
МИГУНА Николая Петровича*

Могилев
ГУ ВПО «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
2014

УДК 620.179.1«324»(043.2)
ББК 34.47
С56

Редакционная коллегия : д-р техн. наук, проф. И. С. Сазонов (гл. редактор); д-р техн. наук, доц. В. М. Пашкевич (зам. гл. редактора); В. И. Кошелева (отв. секретарь); д-р физ.-мат. наук, проф. В. И. Борисов; д-р техн. наук, проф. В. А. Новиков; канд. техн. наук, доц. С. С. Сергеев

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. А. Р. Баев; д-р техн. наук, проф. В. А. Новиков; д-р физ.-мат. наук, проф. В. И. Борисов; д-р техн. наук, проф. В. Л. Венгринович; д-р техн. наук, проф. А. В. Хомченко; канд. техн. наук, доц. С. С. Сергеев

Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов : материалы 5-й междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Нац. акад. наук Респ. Беларусь, Ин-т прикладной физ. НАН Респ. Беларусь, Белорусская ассоциация неразруш. контр. и техн. диагн., Рос. общество по неразруш. контр. и техн. диагн., УП «Белгазпромдиагностика», Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2014. – 328 с. : ил.
ISBN 978-985-492-135-8.

Представлены результаты фундаментальных, поисковых и прикладных исследований в области: физики взаимодействия различных полей и излучений с объектами и средами; техники восприятия, передачи, преобразования и отображения измерительной информации о параметрах объектов; мониторинга и диагностики состояния технических объектов.

Рассмотрены вопросы применения современных методов, приборов и методик неразрушающего контроля и технической диагностики в нефтехимии, энергетике, транспорте и строительстве, а также проблемы подготовки специалистов по контролю качества для различных отраслей промышленности.

Сборник предназначен для инженерно-технических и научных работников, аспирантов и студентов вузов.

УДК 620.179.1«324»(043.2)
ББК 34.47

ISBN 978-985-492-135-8

© ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», 2014

– совершенствование существующих и разработка новых методов и методик научных исследований по приоритетным направлениям науки и заказам промышленных предприятий;

– разработка и реализация мероприятий программы развития ЦКП.

Работа университетского центра коллективного пользования контрольно-измерительным и испытательным оборудованием осуществляется в соответствии с положением, в котором регламентированы общие принципы его деятельности.

Положение «О центре коллективного пользования и испытательным оборудованием включает в себя элементы: общие положения; цели и задачи; структура и управление центром; основы функционирования центра; финансирование и материальная база; организация доступа к оборудованию и средствам измерений; права и обязанности преподавателей, учёных и организаций, пользующихся услугами ЦКП; порядок реорганизации или прекращения деятельности центра коллективного пользования.

Создание центра коллективного пользования измерительным и испытательным оборудованием при университете позволяет не только повысить эффективность использования имеющегося технического обеспечения учебного процесса при реализации основных образовательных программ высшего профессионального образования, дополнительного образования и профессиональной подготовки, но и создать условия для расширения перечня образовательных и научных услуг, оказываемых потенциальным заказчикам – промышленным предприятиям и организациям региона, а также государственным учреждениям, решающим вопросы повышения квалификации кадров для предприятий местной промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нормативно-правовое регулирование и научно-методическое обеспечение функционирования и формирования сети центров коллективного пользования. Доклад на Совещании руководителей центров коллективного пользования [Электронный ресурс] / Ю. П. Фомичев, А. И. Шелгунов. – Режим доступа: www.ifti.ru.

2. **Темердашев, З. А.** Некоторые предложения развития методологии и использования центров коллективного пользования / З. А. Темердашев, С. В. Ратнер // Качество. Инновации. Образование. – 2004. – № 2. – С. 67–74.

3. **Голенков, В. А.** Подготовка рабочих кадров для предприятий отраслей машиностроения в условиях университетского учебно-научно-производственного комплекса / В. А. Голенков, В. В. Светкин // Эффективность и качество в машиностроении и приборостроении : материалы второй Междунар. науч.-техн. конф., Карачев, 23–25 сент. 2011 г. / Под общ. ред. Ю. С. Степанова. – Орёл : Госуниверситет – УНПК, 2011. – С. 4–7.

E-mail: pms35vm@yandex.ru

ных научных исследований и на их основе создание конкурентоспособных образцов новой техники, их дальнейший трансферт в реальный сектор экономики, а также подготовка квалифицированных специалистов для региона, обладающих творческим инновационным мышлением и способных быстро адаптироваться в рыночной экономике.

Структура ЦКП представляется следующим образом. В качестве основных подразделений в ЦКП входят лаборатории и другие структуры базовой организации, профиль деятельности которых относится к данному центру. Руководит деятельностью ЦКП директор, который назначается на должность и освобождается от нее руководителем базовой организации. Деятельность ЦКП контролирует научно-координационный совет (НКС), сформированный в соответствии с утвержденным регламентом. В состав НКС входят представители базовой организации, а также специалисты ведущих региональных научных школ. В функции НКС входят: осуществление надзора за деятельностью ЦКП; принятие решений об изменении структуры центра; рассмотрение и утверждение кадрового состава ЦКП, планов и отчетов о его деятельности.

Структура ЦКП сформирована на основе подхода, разработанного для концепции университетского учебно-научно-производственного комплекса, модель которого представлена в работе [3]. Центр создан на базе единства собственности, право владения которой принадлежит университету. Это обеспечивает стабильность и эффективность функционирования лабораторий и управления имуществом.

Центром коллективного пользования решаются следующие задачи:

- обеспечение доступа исследователей и других заинтересованных сторон к современной инфраструктуре сектора исследований и разработок на принципах режима коллективного пользования оборудованием;
- повышение уровня научных исследований и качества образования путём формирования современных исследовательских комплексов, отвечающих мировым стандартам по техническим и эксплуатационным характеристикам приборного парка;
- подготовка специалистов высшего профессионального образования для промышленных предприятий – потенциальных работодателей на базе современного учебного и научного оборудования;
- техническое обеспечение процесса реализации учебных программ дополнительного образования и профессиональной подготовки специалистов промышленных предприятий;
- предоставление услуг сторонним организациям по использованию научного оборудования, развитие номенклатуры оказываемых услуг;
- поддержание в рабочем состоянии и развитие материально-технической базы центра коллективного пользования путём пополнения имеющихся лабораторных комплексов приобретаемым современным учебным и научным оборудованием для обеспечения и развития исследований в режиме коллективного пользования;

СОДЕРЖАНИЕ

Пленарное заседание

ПОТАПОВ А.И. Приборы и методы неразрушающего контроля изделий из композиционных и крупно-структурных материалов.....	11
СЕРГЕЕВ С.С. Перспективы многоуровневой подготовки специалистов по неразрушающему контролю и диагностике.....	21

Секция 1. Дефектоскопия материалов и промышленных изделий.

АББАКУМОВ К.Е., КОНОВАЛОВ Р.С. Рассеяние поверхностных волн Рэлея трещиноподобным дефектом нормальным к поверхности упругого тела.....	26
АРЗАМАСЦЕВ А.М., ЛЕДНОВ А.Ю., ПОПОВ А.В., САВЧЕНКО Г.Ю., САВЧЕНКО Ю.И. Диагностика состояния футеровки доменной печи.....	29
БАЕВ А.Р., АСАДЧАЯ М.В., СЕРГЕЕВА О.С., КОНОВАЛОВ Г.Е. Влияние отходящей моды на поле краевых волн, возбуждаемых поверхностной волной на выступе.....	32
БАЕВ А.Р., МАЙОРОВ А.Л., СЕРГЕЕВА О.С., ПАРАДИНЕЦ В.В. Поле продольной волны при падении акустического луча под первым критическим углом.....	35
БАЕВ А.Р., ГУДЕЛЕВ В.Г., МИТЬКОВЕЦ А.И., СТОЙЧЕВА И.В., КОСТЮК Д.А. О выявлении поверхностных дефектов движущимся лучом импульсно-лазерного излучения.....	38
БОРИСОВ В.И., СЕРГЕЕВ С.С., НИКИТИН А.С. Тонкая структура акустического поля излучения круглой пьезопластины.....	41
БОРИСОВ В.И., СЕРГЕЕВ С.С., ПРОКОПЕНКО Е.Н., ПРОКОПЕНКО С.А. Расчет акустического поля излучения одномерной фазированной решетки.....	44
БУСЬКО В.Н. Датчик для контроля усталостных трещин при циклических испытаниях ферромагнитных образцов.....	48
ГРИНЧУК П.С., СТЕТЮКЕВИЧ Н.И., ШЕВЦОВ В.Ф. Тепловизионный неразрушающий контроль состояния футеровки печей машиностроительного производства в натурных условиях.....	50
ЖАГОРА Н.А., ФЕДОРОВ В.В. Новые подходы к метрологическому контролю современных ультразвуковых дефектоскопов в связи с вводом в действие межгосударственного стандарта ГОСТ EN 12668.....	52
КЛИМОВИЧ Д.И., СЕРГЕЕВ С.С., СКВОРЦОВ А.Ю. Исследование метрологических возможностей ультразвукового контроля сварных соединений.....	55
ЛУХВИЧ А.А., ГУСЕВ А.П., ПИУНОВ В.Д. Исследование характеристик источника переменного магнитного поля для эталона	

магнитной индукции.....	58
МЕЛЬНИКОВА И.С., БОРИСОВ В.И. Применение метода тепловизионного контроля для обнаружения дефектов дорожных покрытий.....	60
НОСОВ В.В. Контроль качества заготовок проката на основе анализа результатов регистрации сигналов акустической эмиссии.	63
НОСОВ В.В., ПОТАПОВ А.И., ГОМЕРА В.А. Акустический контроль состояния сосудов давления.....	66
ПАВЛОВ И.В. Неразрушающий контроль качества гранита при добыче и обработке.....	69
ШИЛОВ А.В., НОВИКОВ В.А., КУШНЕР А.В., СКРЕБУНОВ А.А., КОВАЛЕНКО М.С. Производственные испытания магнитного метода контроля с визуализацией полей дефектов на пленке.....	72

Секция 2. Контроль структуры и физико-механических характеристик материалов и изделий.

БАННЫЙ В.А. Радиочастотный способ определения водонасыщенности твердых тел.....	74
БАРАБАНОВ П.А., ЛУНИН В.П., СТОЛЯРОВ А.А. Моделирование и анализ сигналов от проводящих отложений на внешней поверхности теплообменных труб при контроле вихретоковым методом.....	77
БЕЛКИН В.Г., ВАСИЛЕВИЧ Л.Н., ТИТОВИЦКИЙ И.А. Применение метода инфракрасной селективной влагометрии для контроля влажности макулатурного сырья.....	80
БУРАК В.А., КОРОТКЕВИЧ З.М. Информативные параметры для магнитного контроля качества отпуска инструментальной стали У10А.....	82
ВАСИЛЕВИЧ Ю.В., НЕУМЕРЖИЦКАЯ Е.Ю., МОЖАРОВСКИЙ В.В. Методика и результаты экспериментального определения механических характеристик труб из полимерных композиционных материалов.....	84
ВИНТОВ Д.А., ВЕНГРИНОВИЧ В.Л., ЛАПИЦКАЯ В.А. Учет структурной и геометрической неоднородности поверхности при построении калибровочных характеристик при контроле остаточных напряжений методом эффекта Баркгаузена.....	87
ВОРОБЕЙ Р.И., ГУСЕВ О.К., ТЯВЛОВСКИЙ А.К., ТЯВЛОВСКИЙ К.Л., СВИСТУН А.И., ШУМСКИЙ А.Э. Измерительный преобразователь прибора контроля параметров жидких технологических сред на базе трансформаторного датчика.....	90
ГОРКУНОВ Э.С., СУБАЧЕВ Ю.В., ПОВОЛОЦКАЯ А.М., ЗАДВОРКИН С.М. Эволюция магнитных параметров двухслойного ферромагнетика, составленного из компонентов с магнитострикци-	

УДК 658.018 ЦЕНТР КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ И ИСПЫТАТЕЛЬНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ КАК ЭЛЕМЕНТ НАУЧНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ УНИВЕРСИТЕТА

К. В. ПОДМАСТЕРЬЕВ, Ж. А. СЕКАЕВА, В. В. МАРКОВ
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК»
Орёл, Россия

Под центром коллективного пользования (ЦКП), как правило, понимают имущественный комплекс, созданный на базе высших учебных или научно-исследовательских организаций, обеспечивающий режим коллективного пользования прецизионным дорогостоящим научным и технологическим оборудованием структурными подразделениями базовой организации, а также сторонними пользователями [1].

В практике инновационной деятельности сформировалось несколько видов центров коллективного пользования, обладающих характерными признаками [2]. ЦКП научно-исследовательского типа создаются с целью централизации оборудования, предназначенного для выполнения научно-исследовательских работ коллективами головной организации и обеспечения режима коллективного пользования прецизионным дорогостоящим научным и технологическим оборудованием как структурными подразделениями головной организации, так и сторонними пользователями. Структура и функции ЦКП производственного профиля соответствуют инновационно-промышленным комплексам и технопаркам. ЦКП для подготовки кадров требует разработки новых учебных программ, базирующихся на системном подходе к производству, на более тесной связи инженерного, экономического и гуманитарного образования. Подготовленные по этим программам специалисты должны быть способны принимать ответственные инженерные, экономические и управленческие решения на любой из стадий производства: от проектирования, создания, внедрения, эксплуатации новейших технологий до продажи и обслуживания созданной на этой основе продукции высокого качества.

В Орловском государственном техническом университете (в настоящее время – Госуниверситет-УНПК) центр коллективного пользования (ЦКП) контрольно-измерительным и испытательным оборудованием интегрирован в модель университетского учебно-научно-производственного комплекса, получившего аббревиатуру «УНПК» [3].

По мнению авторов работы [3], создание университетских комплексов обеспечивает единство триады «образование-наука-производство» и является оптимальным решением проблемы подготовки кадров от рабочего до инженера, кандидата и доктора наук. В университетском комплексе сочетаются получение новых знаний, проведение фундаментальных приклад-

вознаграждение и в случае, когда работодатель принял решение о сохранении служебного произведения в тайне и по этой причине не начал использование этого произведения в указанный срок. Размер вознаграждения, условия и порядок его выплаты работодателем определяются договором между ним и работником, а в случае спора – судом.

Работодатель может при использовании служебного произведения указывать свое имя или наименование либо требовать такого указания.

Ну и наконец – если авторское право будет нарушено, чем это грозит нарушителю? Автор или иной правообладатель в соответствии со статьей 1301 наряду с использованием других применимых способов защиты и мер ответственности, установленных ГК РФ [1] имеет право требовать компенсацию в размере от десяти тысяч рублей до пяти миллионов рублей, определяемом по усмотрению суда; аналогичные наказания предусматривает Кодекс РФ об административных правонарушениях [2]. Особо кровожадные могут воспользоваться статьей 146 УК РФ [3], которая кроме штрафов предусматривает исправительные работы и арест. Также не надо забывать о требованиях Федерального закона N 152-ФЗ «О персональных данных» [4], целью которого является обеспечение защиты прав и свобод человека и гражданина при обработке его персональных данных, в том числе защиты прав на неприкосновенность частной жизни, личную и семейную тайну, А также закона «Об авторском праве и смежных правах» [5,6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гражданский кодекс РФ Глава 70. Авторское право.
2. Кодекс РФ об административных правонарушениях. Статья 7.12. Нарушение авторских и смежных прав, изобретательских и патентных прав.
3. Уголовный кодекс РФ. Глава 19. Статья 146. Нарушение авторских и смежных прав.
4. Федеральный закон N 152-ФЗ «О персональных данных».
5. Федеральный закон «Об авторском праве и смежных правах».
6. Комментарий к Закону РФ «Об авторском праве и смежных правах» (постатейный) / В. В. Погуляев, В. А. Вайпан, А. П. Любимов // Юстицинформ. – 2006.

ей разных знаков, при упругом деформировании.....	93
ГОРКУНОВ Э.С., ПОВОЛОЦКАЯ А.М., ТУЕВА Е.А., ЗАДВОРКИН С.М. Структура, механические и магнитные свойства двухслойного композиционного материала при пластической деформации.....	97
ЗУБКО В.И., ЗУБКО Д.В., СИЦКО Г.Н. Оперативные методы контроля и диагностики комплекса диэлектрических свойств материалов электротехнического назначения.....	100
КАЦАЛАП К.Ю., БЕЛЬКОВ М.В., КАРОЗА А.Г. Контроль элементного состава калиевых руд методами лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии.....	103
КИРИС В.В., РАЙКОВ С.Н., БЕЛЬКОВ М.В. Определение содержания неметаллов в бетоне при помощи мобильного лазерного спектрометра.....	106
КОСТИН В.Н., ФИЛАТЕНКОВ Д.Ю., ВАСИЛЕНКО О.Н., СТАШКОВ А.Н. Спектральные характеристики магнитоакустической эмиссии и магнитные свойства деформированных и термообработанных сталей.....	109
КРЕНЬ А.П., ПРОТАСЕНЯ Т.А., КУЗНЕЦОВА Т.А. Определение физико-механических характеристик пространственно-армированных углеродных композиционных материалов.....	112
КУКУШКИНА Ю.М., БОНДАРЕВА Е.В. Экспресс-метод определения несминаемости текстильных материалов.....	115
МАРКОВ А.П., СЕРГЕЕВ С.С. Погрешности трансформации информативного излучения в спектрально-энергетической мутнометрии.....	118
МАТВЕЕВ А.К., РЖАНАЯ Е.С., ПЕТЮЛЬ И.А., МАТВЕЕВ К.С. Моделирование и разработка конструкции установки для испытания полимерных материалов на изгиб.....	122
ПАНКЕВИЧ Д.К., РАДЮК А.Н., БУРКИН А.Н. Анализ показателей качества материалов для водозащитной одежды.....	125
ПОПЕЧИЦ В.И. Неразрушающий радиоционный контроль структуры материалов и изделий с помощью красителей.....	128
ПОТАПОВ А.И. Неразрушающий контроль анизотропии композиционных материалов в изделии.....	131
ПУДОВ В.И., РЕУТОВ Ю.Я. Применение феррозондовихретоковой аппаратуры для определения ферромагнитной неоднородности.....	137
САВИН И.С., ТЕРЕХИН И.В. Исследование свойств вихретокового датчика уровня металла сортового кристаллизатора и разработка алгоритма обработки его сигнала.....	141
САНДОМИРСКИЙ С.Г. Особенности намагничивания чугунов под влиянием внутреннего коэффициента размагничивания.....	143

САНДОМИРСКИЙ С.Г. Совершенствование преобразователя для измерения остаточного магнитного потока изделий массового производства.....	146
СКУРТУ И.Т., ЕРОШЕНКО А.С., БРАНОВИЦКИЙ И.И. Метод и прибор для выявления витковых замыканий в маломощных тороидальных трансформаторах.....	149
СКУРТУ И.Т., БРАНОВИЦКИЙ И.И. Быстрый метод расчета длины среднего магнитного пути в задачах контроля магнитомягких материалов.....	152
СЧАСТНЫЙ А.С., ОСИПОВ А.А. Исследование возможности контроля коэффициента нормальной анизотропии листового проката стали импульсным магнитным методом.....	154
ХОМЧЕНКО А.В., ПРИМАК И.У., ВАСИЛЕНКО А.Н. Анализ полей механических напряжений в автомобильных закаленных стеклах.....	156
ЧЕРНОВ Д.В., БАРАТ В.А., ЕЛИЗАРОВ С.В. Оценка состояния материала с индикаторным тензопокрытием на основе микро-механической модели акустической эмиссии.....	160
ШУКЕВИЧ А.К., ШАРАНДО В.И., ЯНУШКЕВИЧ К.И. Магнитодинамический метод контроля содержания ферромагнитной фазы в нержавеющей сталях аустенитного класса.....	163
Секция 3. Контроль геометрических параметров объектов	
ГНУТЕНКО Е.В., РУДНИЦКИЙ В.А. Влияние шероховатости на результат измерения магнитным пондеромоторным методом толщины никелевых покрытий.....	166
ДУДЧИК Ю.И. Получение изображения источников рентгеновского излучения с использованием преломляющей рентгеновской линзы и пинхол камеры.....	169
ЕРМАКОВИЧ О.Л., ЛISOVСКИЙ Г.А., ТИТОВИЦКИЙ И.А. Рассеяние бета-излучения листовым материалом в измерительном зазоре радиоизотопного плотномера.....	172
ЗАГОРСКИЙ И.Е. Компенсация начального значения напряжения абсолютного вихретокового преобразователя при многочастотном методе контроля.....	174
ЛЕБЕДЕВ В.И., СОТСКИЙ А.Б., КОТЯШЕВ Е.О. Влияние вращения земли на колебания крутильного маятника.....	176
ЛУХВИЧ А.А., ЛУКЬЯНОВ А.Л., БУЛАТОВ О.В., ПОЛЯКОВА М.Н., МОСЯКИН В.В. Контроль никелевых покрытий камер сгорания ракетных двигателей после нанесения хромовых магнитодинамическим методом толщинометрии.....	179
МИХНЁВ В.А. Резонансные микроволновые датчики для толщинометрии и влагометрии.....	182

В своей работе мы часто используем фрагменты из произведений других авторов или цитируем полностью это произведение, снабжая своими комментариями, предисловиями или послесловиями. При этом необходимо помнить, что статья 1266 защищает право на неприкосновенность произведения и не допускает без согласия автора внесение в его произведение изменений, сокращений и дополнений, снабжение произведения при его использовании иллюстрациями, предисловием, послесловием, комментариями или какими бы то ни было пояснениями.

В связи с этим возникает вопрос о сроке действия авторского права. Закон устанавливает, что исключительное право на произведение действует в течение всей жизни автора и семидесяти лет, после его смерти. Более того статья 1270 предоставляет исключительное право автору использовать произведение в любой форме и любым способом. Никто не может без его разрешения произведение тиражировать (в том числе даже в 1 экземпляре), воспроизводить, при этом запись произведения на электронном носителе, в том числе запись в память ЭВМ также является нарушением авторского права. Запрещается публичный показ произведения, то есть любая демонстрация оригинала или экземпляра произведения непосредственно либо на экране с помощью пленки, диапозитива, телевизионного кадра или иных технических средств, а также демонстрация отдельных кадров аудиовизуального произведения без соблюдения их последовательности непосредственно либо с помощью технических средств в месте, открытом для свободного посещения, или в месте, где присутствует значительное число лиц, не принадлежащих к обычному кругу семьи. Иными словами, часто практикуемая нами передача студентам книг, пособий и других авторских материалов в электронном виде незаконна.

И последнее, большинство наших авторских произведений мы создаем в процессе выполнения наших служебных обязанностей, т. е. они являются служебными произведениями. Статья 1295 гласит, что авторские права на произведение науки, литературы или искусства, созданное в пределах установленных для работника (автора) трудовых обязанностей (служебное произведение), принадлежат автору. Вместе с тем исключительное право на служебное произведение принадлежит работодателю, если трудовым или иным договором между работодателем и автором не предусмотрено иное.

Если работодатель в течение трех лет со дня, когда служебное произведение было предоставлено в его распоряжение, не начнет использование этого произведения, не передаст исключительное право на него другому лицу или не сообщит автору о сохранении произведения в тайне, исключительное право на служебное произведение принадлежит автору.

Если работодатель в течении трех лет начнет использование служебного произведения или передаст исключительное право другому лицу, автор имеет право на вознаграждение. Автор приобретает указанное право на

Особо следует отметить, что для возникновения, осуществления и защиты авторских прав не требуется регистрация произведения или соблюдение каких-либо иных формальностей.

Справедливости ради следует заметить, что правообладатель для оповещения о принадлежащем ему исключительном праве на произведение вправе использовать знак охраны авторского права, который помещается на каждом экземпляре произведения и состоит из следующих элементов: латинской буквы "С" в окружности (© или в англоязычной транскрипции ®); имени или наименования правообладателя; года первого опубликования произведения. Знак © называется копирайт (с английского Copyright – «право на копирование») – это символ авторского права, особый формат оповещения о вашем авторском праве на любое произведение, где вы поставите метку ©, а также свое имя или наименование правообладателя, а также год первой публикации произведения. Чтобы набрать знак Копирайт на компьютере, надо нажать и удерживать клавишу «Alt» и на цифровой панели справа набрать **0169** (на верхних клавишах знак © набрать не получится). На ноутбуках эта клавиатура «впечатана» справа в общем строю клавиш.

Знак охраны авторского права – копирайт © нигде регистрировать не надо. Право на его использование вы получаете, как только создали любой объект, на который распространяется понятие **авторское право**: сайт, книгу, статью, фотографию, перевод, компьютерную программу. Формат оповещения знаком копирайт © был установлен Всемирной (Женевской) Конвенцией об авторском праве в 1952 г.

Вместе с тем авторские права не распространяются на идеи, концепции, принципы, методы, процессы, системы, способы, решения технических, организационных или иных задач, открытия, факты, языки программирования.

Нам часто приходится писать учебные пособия и тут возникает целая цепь возможных нарушений прав авторов цитируемых источников, но с другой стороны возникает и наше авторское право на авторство составного произведения. Этому вопросу посвящается статья 1260, в которой отмечается, что составителю сборника и автору иного составного произведения (антологии, энциклопедии, базы данных и т.д.) принадлежат авторские права на осуществленные ими подбор или расположение материалов (составительство). Составитель либо иной автор производного или составного произведения осуществляет свои авторские права при условии соблюдения прав авторов произведений, использованных для создания производного или составного произведения.

Авторские права составителя и иного автора производного или составного произведения охраняются как права на самостоятельные объекты авторских прав независимо от охраны прав авторов произведений, на которых основано производное или составное произведение.

ПАРАШКОВ С.О., КРИВЕЦКИЙ К.Н., СОТСКИЙ А.Б., ДЗЕН И.С., СОТСКАЯ Л.И. К проблеме отражательной спектрофотометрии неоднородного слоя.....	185
ПАРАШКОВ С.О., СТАСЬКОВ Н.И., ХОМЧЕНКО А.В., СОТСКАЯ Л.И., ШИЛОВ А.В., КРЕКОТЕНЬ Н.А. Переходные слои в ПДП-структуре.....	188
СКИЦЮК В.И., КЛОЧКО Т.Р. Моделирование поверхности абстрактного технологического объекта при точных измерениях геометрических параметров.....	191
СТОЛЯРОВ А.А., ЛУНИН В.П., БАРАБАНОВ П.А. . Определение толщины электропроводящих отложений.....	193
ХОМЧЕНКО А.В., ПРИМАК И.У., КОРНЕЕВА И.А., СТАСЬКОВ Н.И., КРЕКОТЕНЬ Н.А. Рефлектометрические методы диагностики наноразмерных металлических слоев на подложке.....	195
ЧЕРНЫШЕВ А.В. Влияние вариаций электромагнитных параметров двухслойной структуры на фазу вносимой ЭДС накладного преобразователя вихретокового толщиномера.....	198
ШАРАНДО В.И., ПОЛОНЕВИЧ А.А. Толщинометрия никелевых покрытий на стали при разном радиусе сферических окончаний электродов.....	201
JAROSZEWICZ J., RADZISZEWSKI L., DRAGUN L. Methods of wear conditions bearing alloy of split bushings which are applied in turbines.....	204

Секция 4. Мониторинг, диагностика и прогнозирование остаточного ресурса технических объектов

БАРАНДИЧ Е.С., ВЫСЛОУХ С.П. Прогнозирование предела выносливости деталей приборов и машин.....	205
БОРОЗНА В.Д., ДМИТРИЕВ А.П., БУРКИН А.Н. Неразрушающие методы контроля качества искусственных кож для верха обуви.....	207
БРАНЦЕВИЧ П.Ю. Сравнительный анализ амплитудно-частотных вибрационных характеристик.....	210
БРАНЦЕВИЧ П.Ю., БАЗЫЛЕВ Е.Н. Программные средства исследования амплитудно и фазочастотных параметров вибрационных сигналов.....	213
ВИНОГРАДОВА Л.Н., ДАНИЛИЦКИЙ С.В. Оценка состояния подшипника скольжения методами неразрушающего контроля в режиме реального времени.....	216
ВИШНЕРЕВСКИЙ В.Т., СТАСЕНКО И.С., КОРНЕЕВ А.А., ЛЕНЕВСКИЙ Г.С. Применение акселерометров при контроле характеристик протяженных упругих объектов.....	219
ЕЛИСЕЕВА М.А., МАЛОВИК К.Н. Прогнозирование остаточ-	

ного ресурса сложных объектов методом гиперслучайных величин...	221
ЖАРИН А.Л., ПАНТЕЛЕЕВ К.В., СВИСТУН А.И. Диагностика узлов трения методом контактной разности потенциалов.....	224
ЗАВАЛЬНЮК И.П. Анализ существующих методов контроля герметичности закупоренных консервных банок.....	226
КРЫШНЁЎ Ю.В., ЗАХАРАНКА Л.А., МЕЛЬНИКАЎ А.В. Сістэма маніторынгу ахоўнага патэнцыялу для нафтаправода з выкарастаннем тэлекамунікацыйнага канала.....	228
МАРКОВ В.В. Оценка качества и дефектов сборки опоры качения по электрорезистивным диагностическим параметрам.....	231
МИРОШНИКОВ В.В., НЕСТЕРЕНКО В.Б., ЗАВАЛЬНЮК О.П. Неразрушающий контроль несущих элементов судовых конструкций в процессе их эксплуатации.....	234
МОЖАРОВСКИЙ В.В., КУЗЬМЕНКОВ Д.С. Определение физико-механических свойств материалов слоистых труб: мониторинг и расчет.....	237
НАУМОВ А.О., АРТЕМЬЕВ В.М., КОХАН Л.Л. Моделирование полей концентрации электронов в ионосфере на основе многомерных стохастических конечно-разностных уравнений.....	240
НЕФЕДЬЕВ Д.И., ВОЛКОВ В.С., БАРИНОВ И.Н., ТРОФИМОВ А.А. Функционирование системы мониторинга и контроля при определении остаточного ресурса технически сложных объектов.....	243
НЕФЕДЬЕВ Д.И., ПОЛОСИН В.Г., БОДИН О.Н. Особенности управления динамической системой путем минимизации энтропийного потенциала.....	246
НОСОВ В.В. Оценка состояния шарниров противовеса дворцового моста с помощью метода акустической эмиссии.....	249
ПАНТЕЛЕЕВ К.В., ЖАРИН А.Л., СВИСТУН А.И. Диагностика модифицированной трением поверхности композитов на основе ПТФЭ по плотности распределения поверхностного потенциала.....	252
ПОНОМАРЕВА Н.В. Метод спектрального анализа виброакустических сигналов в заданном диапазоне частот.....	255
ПОНОМАРЕВА О.В. Метод выявления скрытых периодичностей в виброакустических сигналах на основе параметрического дискретного преобразования Фурье.....	258
ПОНОМАРЕВА О.В., ПОНОМАРЕВ А.В., ПОНОМАРЕВ В.А. Метод выявления скрытых периодичностей в виброакустических сигналах на основе дискретного преобразования Фурье.....	261
ПРУДНИКОВ А.Н., ВИНТОВ Д.А., ВЕНГРИНОВИЧ В.Л., ПОДУГОЛЬНИКОВ П.А. Влияние поверхностного деформированного слоя металла на параметры магнитного шума Баркгаузена.....	264
СЕЛИВАНОВ В.А. Улучшение энергетических показателей	

сельских школ в этом деле наводится порядок. Компьютеры продаются только с лицензированным программным обеспечением, а те, кто оставил на своих ноутбуках нелегальное программное обеспечение, уже с опаской берут их в людные места типа конференций и симпозиумов, проверка может настигнуть в любой момент: при подключении к мультимедийным проекторам, скачивании материалов конференции и т.д. – вольнице в этом вопросе приходит конец.

Начинается массированное наведение порядка с авторством и в Интернете. Что же необходимо знать об авторском праве преподавателю вуза готовясь к лекции, конференции, симпозиуму, подготавливая статьи и монографии к публикации?

Авторское право в России регулируется несколькими законами и подзаконными актами, основным из которых является Гражданский кодекс РФ, а точнее Глава 70. АВТОРСКОЕ ПРАВО.

Авторские права распространяются на интеллектуальные права на произведения науки, литературы и искусства, а значит и на все источники информации, которыми мы пользуемся при создании научно-технических отчетов, учебных пособий, статей, презентаций. При этом автору произведения принадлежат следующие права:

- а) исключительное право на произведение;
- б) право авторства;
- в) право автора на имя;
- г) право на неприкосновенность произведения;
- д) право на обнародование произведения.

А также и другие права, в том числе право на вознаграждение за использование служебного произведения, право на отзыв.

Автором произведения науки, литературы или искусства признается гражданин, творческим трудом которого оно создано. Лицо, указанное в качестве автора на оригинале или экземпляре произведения, считается его автором, если не доказано иное. Отдельно и подробно в кодексе разбираются вопросы соавторства, в особенности права соавторов на использование научного труда и право на вознаграждение.

Объектами авторских прав являются произведения науки, литературы и искусства независимо от достоинств и назначения произведения, а также от способа его выражения, в том числе фото и видеоматериалы, программы для ЭВМ, которые охраняются как литературные произведения.

Интересно, что авторские права распространяются как на обнародованные, так и на необнародованные произведения, выраженные в какой-либо объективной форме, в том числе в письменной, устной форме (в виде публичного произнесения, публичного исполнения и иной подобной форме), в форме изображения, в форме звуко- или видеозаписи.

Хотим мы или не хотим, но новые технологии стремительно входят в нашу жизнь и наряду с очевидными преимуществами несут множество, часто завуалированных, проблем. Ещё несколько лет назад конспект лекций преподавателя представлял собой тетрадь, а то и разрозненные, часто подправляемые и пополняемые листки, содержащие выдержки из утверждённой и рекомендованной литературы. Никаких подозрений на плагиат не могло и быть – курс читался в соответствии с рабочей программой с цитированием утверждённых и рекомендованных к использованию учебников.

С появлением мультимедийных средств стали появляться презентации, сделанные на компьютере, которые в простейшем виде представляли собой отсканированные выдержки из конспекта. Шло время, учебники устаревали, новые не издавались, что приводило к тому, что преподаватели вынуждены были сначала искать учебники в Интернете, а затем и заимствовать из него многочисленные статьи и фотографии. Презентации стали ярче, красочнее, информативнее и мы уже с гордостью на первых слайдах стали ставить своё имя и задумываться о закреплении своего авторства. Многие преподаватели стали не только рекомендовать студентам литературу, но и передавать в электронном виде подготовленные подборки материалов, копии статей и оригинальных материалов из Интернета.

При этом скромная надпись на сайтах предлагаемых информации и картинки «не забывайте, что у каждого изображения есть свой правообладатель» или просто маленькие скромные буквы в уголке © или ® воспринимались нами на уровне: «Минздрав предупреждает...».

Однако, не всё так просто. Интернет и его агент в нашем доме – персональный компьютер (если, конечно, не прикрываться красивым иностранным словом – плагиат) подсадили нас на иглу ворованной информации.

Пока кажется, что это будет продолжаться бесконечно и совесть наша успокаивается соображениями типа: «Я же плачу за доступ в Интернет вот пусть они там и делятся». Но, давайте вспомним немного ближайшую историю. Лишь несколько лет тому назад все мы от школьника до академика дома и на работе пользовались не лицензированным (а честно говоря – просто ворованным) программным обеспечением. Сейчас, после множества судебных исков компании Майкрософт дошедших даже до сибирских

асинхронных электроприводов.....	267
ТРЕТЬЯК З.Ю. Выбор допустимой погрешности измерительного приёмочного контроля на основе оценивания рисков.....	269
ТЫМАНЮК К.С., КОСТЕНКО В.Л., ПОПЕРЕКА Е.Д. Обоснование метода диагностики автомобильного средства.....	273
ХОЛОДИЛОВ О.В., КОРОТКЕВИЧ С.В., КРАВЧЕНКО В.В., БЕЛОНОГИЙ Д.Ю. Диагностика состояния подшипников качения: комплексный подход.....	275
ШУБОЧКИН А.Е. Применение коэрциметрии при комплексном контроле нефтегазопромысловых трубопроводов для определения остаточного ресурса.....	277
ЯСЮКОВИЧ Э.И. Статистическое моделирование в диагностике колесных машин.....	279

Секция 5. Компьютерные технологии в неразрушающем контроле

БАХУР С.И., ГАЛУШКО В.Н. Математическое моделирование параметров надежности и электропотребления.....	281
ВАСИЛЕНКО А.Н., ХОМЧЕНКО А.В., ГУЗОВСКИЙ В.Г. Программное обеспечение поляризационно-оптического метода контроля механических напряжений в протяженных объектах.....	284
ВЕНГРИНОВИЧ В.Л., ЗОЛОТАРЕВ С.А. Априорная информация как способ достижения оптимальной реконструкции из ограниченных данных.....	288
ИШИН Н.Н., ГОМАН А.М., СКОРОХОДОВ А.С., НАТУРЬЕВА М.К. Выделение информативной составляющей вибродиагностического сигнала методом синхронного усреднения.....	291
КАН ШОУЧЯН, ВАН ЮЙЦЗИН, МИКУЛОВИЧ А.В., МИКУЛОВИЧ В.И. Анализ спектра Гильберта вибрационных сигналов подшипников качения на основе множественной эмпирической декомпозиции мод.....	294
КОСТИН В.Н., ВАСИЛЕНКО О.Н. 3D-моделирование магнитных потоков и полей локально намагничиваемых стальных объектов.....	297
КРЮКОВ А.С., ЧЕГОДАЕВ В.В., ЖДАНОВ А.Г., ЛУНИН В.П. Расчет количества элементов матричного преобразователя с помощью компьютерного моделирования при вихретоковом контроле цилиндрических изделий.....	300
ПАВЛЮЧЕНКО В.В., ДОРОШКЕВИЧ Е.С. Программное обеспечение метода гистерезисной интерференции в импульсных магнитных полях.....	303
РОМАНЁНОК С.Н., ТКАЧЕВ Д.А., ШИШЛО К.Н. Технический облик современного универсального информационно-	

диагностического средства авиационных двигателей.....	307
ХОДНЕВИЧ С.В. Моделирование электромагнитно-акустических преобразователей в программной среде ELCUT.....	311
ШИШЛО К.Н., РОМАНЁНОК С.Н., ТКАЧЁВ Д.А. Разработка системы интегрированной логистической поддержки эксплуатации беспилотных авиационных комплексов.....	314
Круглый стол	
АРТЕМЬЕВ И.Б., АРТЕМЬЕВ Б.В. К вопросу о дистанционном обучении специалистов по НК и ТД на первый и второй уровни квалификации.....	317
ПАВЛОВ И.В. Авторское право в учебной и научной деятельности в России.....	320
ПОДМАСТЕРЬЕВ К.В., СЕКАЕВА Ж.А., МАРКОВ В.В. Центр коллективного пользования измерительным и испытательным оборудованием как элемент научной инфраструктуры университета.....	325

столь больших затрат ресурсов, а фирменное сопровождение было не удовлетворительным, что мы отказались от ее использования и перешли на работу в собственную оригинальную систему полностью интегрированную с сайтом Российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике.

В системе дистанционного обучения имеются следующие возможности:

- регистрация;
- программы обучения, объединяющие несколько курсов;
- широкий контроль деятельности участников учебного процесса;
- мощнейшая подсистема самотестирования;
- экзаменационные тесты;
- развитые средства общения:
- объявления;
- обмен файлами;
- форум.

Система имеет модульную архитектуру, поэтому она легко расширяется, модернизируется и масштабируется. Для работы с системой от пользователя требуется наличие компьютера, подключенного к сети интернет (скорость > 64 кБ/с), стандартного браузера (не зависит от используемой операционной системы), монитора с разрешением не хуже 1024x768 пикселей и звуковой карты начального уровня. Главное, что требуется от обучающихся – **желание учиться!** Познакомиться с системой можно по адресу RONKTD.RU. Для полноценного использования необходимо зарегистрироваться в системе, получить логин и пароль. В настоящее время ведется работа над дополнительными курсами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Туробов, Б. В.** Визуальный и измерительный контроль / Б. В. Туробов. – М. : Спектр, 2011. – 224 с.
2. **Артемьев, Б. В.** Радиационный контроль / Б. В. Артемьев, А. А. Буклей. – М. : Спектр, 2011. – 192 с.
3. Ультразвуковой контроль / Н. П. Алешин [и др.]. – М. : Спектр, 2011. – 224 с.
4. **Глазков, Ю. А.** Капиллярный контроль / Ю. А. Глазков. – М. : Спектр, 2011. – 144 с.
5. Течеискание / А. И. Евлампиев [и др.]. – М. : Спектр, 2011. – 208 с.
6. **Шелихов, Г. С.** Магнитопорошковый контроль / Г. С. Шелихов, Ю. А. Глазков. – М. : Спектр, 2011. – 184 с.
7. **Артемьев, И. Б.** Система дистанционного обучения персонала РОНКТД / Артемьев И. Б., Артемьев Б. В. // XX Всероссийская науч.-техн. конф. по неразрушающему контролю и технической диагностике : тезисы докладов. ISBN 978-5-4442-0063-6, DOI 10.14489/4442-0063-6. – 2014 г. – С.469–470.
8. **Артемьев, И. Б.** Система дистанционного обучения РОНКТД / Артемьев И. Б., Артемьев Б. В. // Тр. 2-й Всероссийской науч.-техн. конф. SibTest по инновациям в неразрушающем контроле.

сматривается возможность регулировки учебной нагрузки и контроль за работой и успеваемостью «ученика». Подобный подход к обучению персонала постепенно становится доминирующим мировым трендом. Крупнейшие международные организации, в том числе МАГАТЭ, признают, что возможности, предоставляемые дистанционной системой обучения, являются самым актуальным инструментом для дальнейшего развития и гармонизации системы сертификации NDT персонала (ISO 9712 и т.д.) и иницируют самостоятельные проекты по созданию подобных систем. Именно к подобному классу систем обучения можно отнести «Систему дистанционного обучения РОНКТД» (СДО РОНКТД), которая ориентирована на обучение (самоподготовку к теоретическим экзаменам) специалистов по НК и ТД для последующей их сертификации на первый и второй уровни квалификации по различным методам неразрушающего контроля.

В создании СДО РОНКТД приняли участие известные российские специалисты в области НК и ТД: Артемьев Борис Викторович, Глазков Юрий Алексеевич, Комов Михаил Евгеньевич, Мелешко Наталия Владимировна, Сажин Сергей Григорьевич, Тараненко Евгений Васильевич, Шелихов Геннадий Степанович. Большую благодарность хочется выразить рецензентам: Воронковой Любове Владимировне, Пичугину Сергею Евгеньевичу, Косариной Екатерине Ивановне, Тарасенкову Георгию Андреевичу, Масляницкому Николаю Васильевичу, Наумову Вадиму Николаевичу, Попову Евгению Дмитриевичу. Сейчас доступны курсы по визуальному и измерительному контролю, радиационному контролю, ультразвуковому контролю, магнитопорошковому контролю, контролю герметичности и капиллярному контролю [5–8].

В качестве базового стандарта при создании СДО РОНКТД было решено использовать стандарт SCORM – сборник спецификаций и стандартов, разработанный для систем дистанционного обучения. В нем содержатся требования к организации учебного материала и всей системе дистанционного обучения. SCORM позволяет обеспечить совместимость компонентов и возможность их многократного использования: учебный материал представлен отдельными небольшими блоками, которые могут включаться в разные учебные курсы и использоваться системой дистанционного обучения независимо от того, кем, где и с помощью каких средств они были созданы. SCORM основан на стандарте XML, средствами которого описывают структуру учебных блоков и пакетов учебного материала.

СДО РОНКТД – задумывалась, как виртуальный университет позволяющий проводить дистанционное обучение большого числа слушателей, автоматизировав при этом весь учебный цикл – от приема заявок до отметки о выдаче итогового документа о сдаче теста.

На первом этапе создания системы была использована СДО "Прометей", которая эффективно используется в различных проектах государственных и корпоративных структур, ведущими учебными заведениями России, Украины, Казахстана, Беларуси и других стран. Пользовательский интерфейс локализован на украинском, казахском, азербайджанском, английском и французском языках, но сопровождение системы требовало

УДК 620.179

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ И КРУПНО-СТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. И. ПОТАПОВ
ФГБОУ ВПО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ
УНИВЕРСИТЕТ «ГОРНЫЙ»
Санкт-Петербург, Россия

В современной науке и технике, особенно в авиакосмической отрасли, судостроении, строительстве и др. широкое распространение находят неметаллические композиционные и крупно-структурные материалы, такие как бетон и железобетон, асфальтобетон, стекло, органо- и углепластики, углерод-углеродные композиционные материалы, пористые материалы (пенопласт, газобетон и др.), абразивные материалы, горные породы, древесина и др. Неразрушающий контроль качества изделий из этих материалов, особенно крупно-габаритных и толстостенных, весьма затруднен из-за их специфических свойств. Приборы и методы, используемые для металлов практически не пригодны или слабо пригодны для вышеуказанных материалов, так ультразвуковые методы – из-за сильного поглощения и рассеяния высокочастотных ультразвуковых колебаний, электромагнитные методы – так как являются не магнитными и не электропроводными или плохими проводниками (материалы на основе углерода), рентгеновские – мало эффективны из-за низкой плотности, тепловые – из-за малой теплопроводности и т.д.

В результате анализа и изучения литературных источников установлено, что наибольшей эффективностью обладают такие методы как низкочастотные ультразвуковые методы, радиоволновые и оптические методы.

Для контроля физико-механических свойств и дефектоскопии композиционных материалов (преимущественно бетона и железобетона) широкое распространение в 80-е годы получили приборы УКБ-1, УКБ-1М, ДУК-20, «Бетон» и др.

В этих приборах использованы преобразователи со значительно более низким диапазоном частот (25–150 кгц). Однако в данных приборах реализуется метод, основанный на применении только двух преобразователей: излучателя и приемника ультразвуковых волн. Применение совмещенных преобразователей для этих приборов не представляется возможным в связи с большой длительностью (150–300 мксек) ультразвукового сигнала, вырабатываемого излучателем. Поэтому применение этих приборов ограничено необходимостью доступа к изделию с двух сторон, обеспечением значительной базы измерения, низкой производительностью контроля, большим количеством обслуживающего персонала (не мене двух операторов).

В настоящее время широкое распространение получили низкочастотные ультразвуковые приборы – Пульсар-1.1 и Пульсар-1.2, Спектр-1 и Спектр-2, УК1401, ультразвуковой томограф А1040 «Полигон» и др.

Учитывая вышеизложенное, для практики низкочастотных ультразвуковых испытаний важным является разработка такого совмещенного или раздельно-совмещенного преобразователя, который позволит работать в указанном частотном диапазоне при помощи широкополосных сигналов малой длительности типа одиночного выброса.

Для решения данной задачи необходимо проведение комплекса исследований по разработке эхо-импульсной аппаратуры и низкочастотных (20–200 кгц) преобразователей для проведения испытаний на изделиях и конструкциях из композиционных материалов, древесины, бетона, горных пород и других материалов. Эта аппаратура позволяет работать как с одним, так и с двумя преобразователями при помощи специального электронного ключа. Для работы с двумя преобразователями необходимо использовать широкополосный акустический приемник высокой чувствительности. Выполнение этих условий позволит получать объективную и надежную информацию о свойствах материалов по параметрам распространения упругих волн.

Следует отметить, что несмотря на известные решения осуществления эхо-импульсного метода при высокочастотных (свыше 1 мгц) ультразвуковых испытаниях для создания низкочастотного прибора (до 200 кгц) приходится решать ряд принципиально новых технических задач. К числу наиболее важных задач можно отнести следующие:

- согласование генератора возбуждающих импульсов с работой усилителя;
- создание электронного ключа;
- разработка неперегружающегося усилителя;
- исследование и разработка низкочастотных ультразвуковых широкополосных пьезопреобразователей.

Для получения широкополосного упругого импульса длительностью в один период собственных колебаний пьезопреобразователя необходимо обеспечить в спектре собственных колебаний пьезопреобразователя одну частоту на основной моде колебаний, либо кратные частоты мод колебаний, либо разнесенные частоты мод колебаний при этом возбуждение такого преобразователя необходимо производить электрическим сигналом, в спектре которого отсутствует составляющая, равная частоте основной моды.

На кафедре приборостроения Горного университета совместно с ЗАО «Константа» создан экспериментальный макет низкочастотного эхо-импульсного прибора, который работает в эхо-импульсном режиме с преобразователем, излучающим упругий сигнал с регулируемой длительностью в один, два и более периодов основной моды колебаний (рис. 1).

УДК 620

К ВОПРОСУ О ДИСТАНЦИОННОМ ОБУЧЕНИИ СПЕЦИАЛИСТОВ
ПО НК И ТД НА ПЕРВЫЙ И ВТОРОЙ УРОВНИ КВАЛИФИКАЦИИ

И. Б. АРТЕМЬЕВ, Б. В. АРТЕМЬЕВ

ЗАО НИИИН МНПО «СПЕКТР»

«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ

УНИВЕРСИТЕТ им. Баумана»

Москва, Россия

Система дистанционного обучения (СДО) Российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике (РОНКТД) позволяет всем заинтересованным в получении знаний, необходимых для последующей сертификации специалистам, пройти теоретическую подготовку без отрыва от работы и самостоятельно проконтролировать уровень полученных теоретических знаний [1–4].

Сегодня, даже в сравнении с концом прошлого века, резко возрос объем доступной информации буквально по всем направлениям неразрушающего контроля, и молодым специалистам, начинающим свой трудовой путь в этой области, крайне сложно выбрать полезные для обучения материалы. Вместе с тем, некоторая информация со временем теряет свою актуальность, а с введением новых регламентов и стандартов становится не валидной.

Переиздание книг и учебников требует продолжительного времени и больших материальных затрат. Издательства не заинтересованы в выпуске новой редакции книги до полной реализации предыдущего тиража. Перспективной альтернативой традиционным методам обучения является дистанционное обучение. В разных странах и ВУЗах под этим термином понимаются совершенно различные технологии. Например, в университете Саутгемптона (Великобритания) под этим понятием скрывается технология обучения, по которой студентам (ученикам) по почте, в том числе электронной, рассылаются учебные материалы и контрольные тесты. Студенты осваивают материал и выполняют тесты. Результаты возвращаются в университет на проверку. Аналогичная технология используется в заочной физико-математической школе МФТИ (Россия) и многих других учебных заведениях. Использование для доставки материалов электронной почты существенно сокращает время доставки материалов, но не изменяет принципа процесса обучения.

Совершенно иначе организуется процесс обучения, в случае использования идеи интерактивного обучения. Во многих учебных центрах созданы электронные ресурсы, которые в режиме онлайн 24x7 обеспечивают доступ для заинтересованных лиц к тематическим материалам. Более того, подобные системы обеспечивают для обучающегося не только пассивное чтение, прослушивание, просмотр видео и анимации, но и возможность самопроверки и сдачи контрольных тестов. Со стороны «учителя» преду-

ЖЦИ. Согласно стандарту DEF STAN 00-60 БД ВС должна состоять из 104 таблиц.

Для начального этапа автоматизации процессов ТОиР база данных реализуется в сокращенном виде. В ней содержится 27 таблиц, условно разделенных на 7 комплексов: «Выполняемые работы», «Инструменты и КПА», «Материалы», «Организации», «Отказы и неисправности», «Сведения об изделии», «Служебные справочники».

В рамках информационной группы для БАК реализованы следующие задачи:

- учет наличия и состояния изделий и средств их подготовки, ремонта и технического обслуживания;
- учет расхода и остатка ресурсов;
- учет выполнения указаний и директив по эксплуатации изделий комплекса;
- сбор и накопление информации о неисправностях изделий;
- контроль укомплектованности личным составом;
- учет наличия и состояния сменных модулей, загружаемых в беспилотный летательный аппарат (БЛА), и управление процессом снаряжения БЛА в соответствии с заданием;
- анализ показателей трудозатрат;
- оценка технического состояния двигателей, агрегатов и систем на основе прогнозирования изменения параметров авиационной техники в эксплуатации.

Группа диспетчеризации работ включает задачу управление подготовкой к полетам, содержит отдельные задачи учета наличия и состояния сменных модулей и управления процессом снаряжения БЛА в соответствии с заданием.

Оптимизационные задачи связаны с планированием и определением объемов и периодичности ТОиР. Для БАК частично реализованы следующие задачи оптимизационной группы:

- управление подготовкой БЛА к полетам;
- поиск неисправностей изделий на основе совместного анализа замеренных при эксплуатационном контроле параметров.

В перспективе в рамках автоматизации оптимизационных задач ТОиР планируется реализовать:

- планирование отхода изделий комплекса в различные виды ремонта;
- сбор и накопление информации о рекламационной работе;
- контроль хода выполнения доработок изделий;
- учет уровня подготовки специалистов;
- учет, анализ и контроль учебного процесса технической подготовки;
- анализ показателей работы ИТС, сроков подготовки БЛА;
- планирование и контроль выполнения основных технико-экономических показателей работы авиационных ремонтных предприятий.

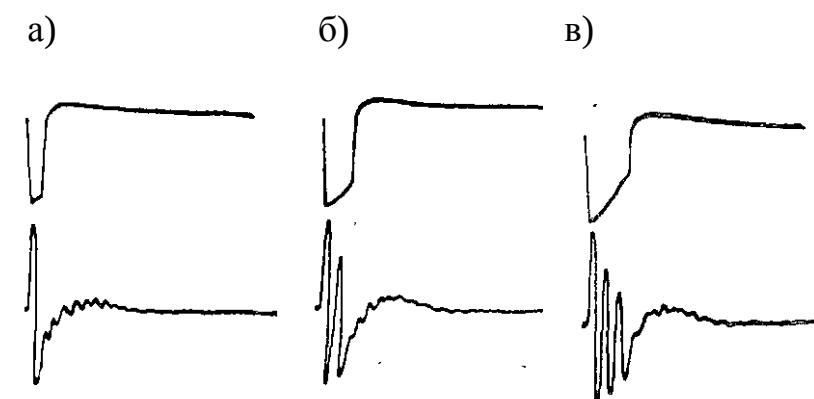


Рис. 1. Форма электрического и ультразвукового сигнала от одномодового моночастотного преобразователя при возбуждении электрическим импульсом: а – длительностью в один период; б – то же, в два периода; в – то же, в три периода

Результаты ультразвукового контроля стеклопластика представлены на рис. 2.



Рис. 2. Осциллограмма ряда отраженных сигналов частотой 50 кгц, длительностью в один период, полученных в изделии из стеклопластика толщиной 40 см

Эксплуатация данного прибора показала его высокую эффективность при неразрушающих испытаниях крупногабаритных конструкций и изделий из композиционных материалов.

Принцип действия радиоволнового метода основан на взаимодействии электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с диэлектрическим объектом контроля и регистрации сигнала, вызванного изменением диэлектрических характеристик объекта контроля.

Для обеспечения одновременного контроля в изделии дефектов и изменения диэлектрической проницаемости композиционного материала функциональная схема прибора должна позволить осуществить настройку в режиме амплитудного или фазового измерения. В первом случае информационным параметром является амплитуда, во втором – фаза волны.

Прибор выполнен в виде двух составных частей: датчика и электронного блока (рис. 3).

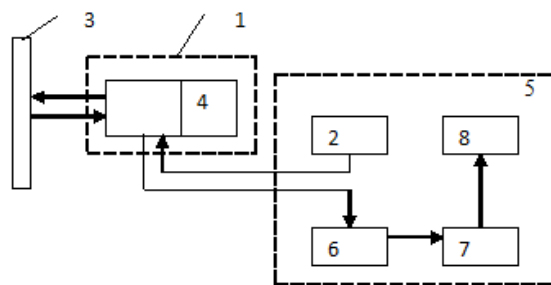


Рис. 3. Структурная схема прибора: 1 – датчик с эталонным образцом, 2 – блок питания и модуляция СВЧ–генератора, 3 – контролируемый объект, 4 – эталонный образец, 5 – электронный блок, 6 – система дефектоскопии, 7 – система определения диэлектрической проницаемости, 8 – компьютер

Работа прибора производится в соответствии со структурной схемой (рис. 3) следующим образом. Источник излучения датчика 1 получает необходимое напряжение от блока питания и модуляции излучателя 2 и вырабатывает электромагнитные колебания, промоделированные меандром. СВЧ–излучение от датчика направляется на контролируемый объект 3 и эталонный образец 4, отраженные от них части излучения взаимодействуют между собой. Результат взаимодействия в виде электрического сигнала выделяется на детекторе датчика. Далее электрические сигналы от детектора подаются в электронный блок 5, в систему дефектоскопии 6, где в автоматическом режиме производится обработка амплитудных характеристик сигнала и выделение сигнала от дефекта, а также производится обработка фазовых характеристик сигнала, который поступает в систему определения диэлектрической проницаемости 7, окончательные результаты контроля обрабатываются и представляются на компьютере 8.

СВЧ – датчик служит для анализа состояния контролируемого материала и выработки сигнала пропорционального изменению состояния материала. Датчик включает в себя СВЧ–тракт (рис. 4), состоящий из генератора 1; двойного волноводного тройника 3; аттенюатора 4; камеры, с эталонным образцом 5; фазовращателя 8; детектора 11; антенны 9 и подвижных короткозамыкателей 2, 7, 12.

Исходя из задач на контроль аномалий в изделии из композиционного материала, была разработана следующая структурная схема прибора (рис.5). Работа прибора производится следующим образом. В датчик 1, на генератор СВЧ, от блока питания 2 электронного блока 3 подается необходимое напряжение, генератор СВЧ начинает вырабатывать электромагнитные колебания. СВЧ излучение подводится к контролируемому изделию 4, взаимодействует с ним, в датчике выделяются информативные сигналы, которые подаются в усилительно-согласующий блок 5. Далее они поступают в систему контроля 1-го канала 6 и систему контроля 2-го канала 7. Далее в блок обработки 8, где вырабатывается сигнал о наличии аномалии.

- формирование и использование базы данных (БД) о техническом состоянии изделия;
- использование электронной технической документации на изделие (интерактивные электронные технические руководства - ИЭТР);
- автоматизация планирования и управления ТОиР изделия;
- автоматизированное использование данных о результатах эксплуатации для совершенствования эксплуатационно-технических характеристик.

ИЭТР в системе ТОиР должны решать следующие задачи:

- а) информационно-справочное обеспечение действий ИТС при ТОиР;
- в) экспертная поддержка процессов принятия решений по результатам контроля технического состояния;
- с) обучение и проверка знаний и умений ИТС.

Важным элементом в реализации метода ИЛП в информационной поддержке ЖЦИ АТ является обеспечение обратной связи между эксплуатирующими организациями с предприятиями промышленности. Обратную связь целесообразно обеспечивать через информационно-аналитический центр логистической поддержки эксплуатации АТ.

В число задач обеспечения такой обратной связи входят:

- статистический анализ результатов эксплуатации (стоимость обслуживания, трудозатраты, темпы выработки ресурса при применении и обслуживании, работа на земле, в воздухе и т.п.);
- опыт по поиску и устранению неисправностей (результаты поиска и устранения неисправностей, дерево поиска, материалы об отказах и способах их устранения);
- опыт применения изделий в реальных условиях эксплуатации;
- сбор и передача данных о результатах контроля и МТО.

Следующее направление реализации ИЛП – автоматизация планирования и управления ТОиР и МТО АТ, включающая:

- комплексную оценку технического состояния парка АТ;
- определение объема и сроков работ по ТОиР с учетом текущего технического состояния изделия, имеющихся материально-технических ресурсов, численности и уровня квалификации ИТС, технических рекомендаций от предприятий разработчиков и производителей, руководящих и научно-исследовательских организаций;
- автоматизацию заявок на поставку ЗИП и ИЭТР.

Задачи ТОиР для АТ можно разделить на три группы: информационные, диспетчеризации работ, оптимизационные.

Для информационных задач, связанных с информационным обеспечением процесса ТОиР, целесообразно формировать БД, которые являются отправной точкой для решения логистических задач эксплуатации АТ. БД должна заполняться, обновляться и функционировать на протяжении всего

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ ЭКСПЛУАТАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ

К. Н. ШИШЛО, С. Н. РОМАНЁНОК, Д. А. ТКАЧЁВ
УО «МИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ВЫСШИЙ
АВИАЦИОННЫЙ КОЛЛЕДЖ»
Минск, Беларусь

Эффективное использование воздушных судов (ВС) не возможно без хорошо организованной системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) авиационной техники (АТ). Для получения конкурентоспособной продукции при проектировании беспилотных авиационных комплексов (БАК) большое внимание должно уделяться разработке эффективной системы ТОиР.

Мировая тенденция повышения эффективности ТОиР АТ определяется внедрением технологий интегрированной логистической поддержки (ИЛП) на всех этапах жизненного цикла изделий. Основные требования к процессам ИЛП определяются иностранными государственными и международными стандартами, такими как стандарт министерства обороны Великобритании DEF STAN 00-60. В соответствии с этими стандартами ИЛП представляет собой четыре тесно взаимосвязанных процесса:

- анализ логистической поддержки (АЛП);
- планирование и управление ТОиР и управление инженерно-техническим составом (ИТС);
- планирование и управление МТО;
- применение интерактивных электронных руководств.

Система сбора, обработки и анализа данных по эксплуатации БАК является частью системы ИЛП изделий авиационной техники и ориентирована, прежде всего, на решение задач разработчика и производителя БАК. Функциональность системы должна обеспечивать получение от эксплуатантов данных о ходе эксплуатации изделия, их накопление, обработку и анализ, с тем, чтобы обеспечить непрерывный мониторинг состояния эксплуатируемых изделий и обеспечить высокий уровень безопасности полетов.

Кроме того, накапливаемые данные могут использоваться для решения задач АЛП (уточнения данных в БД АЛП) в целях дальнейшего совершенствования конструкции и программ ТОиР, улучшения эксплуатационной документации.

Основными направлениями внедрения концепции ИЛП на этапе эксплуатации изделия являются:

Регистрация результатов контроля производится с помощью светодиодов и звуковой сигнализации.

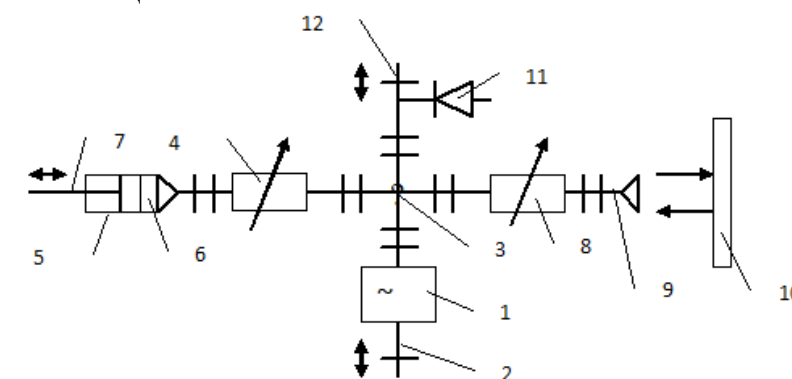


Рис. 4. Схема СВЧ-датчика с двойным волноводным тройником: 1 – генератор, 2 – подвижный короткозамыкатель, 3 – двойной волноводный тройник, 4 – аттенюатор, 5 – камера с эталонным образцом, 6, 7 – подвижные короткозамыкатели, 8 – фазовращатель, 9 – антенна, 10 – объект контроля, 11 – детектор, с подвижным короткозамыкателем; 12 – подвижный короткозамыкатель

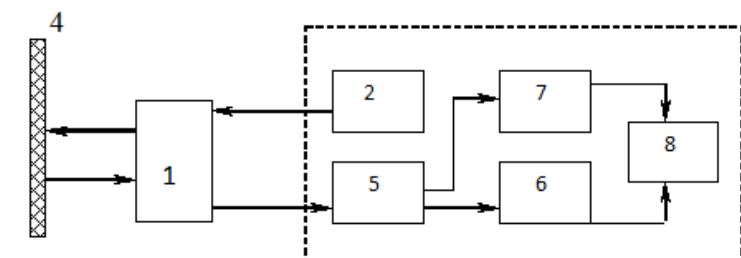


Рис. 5. Структурная схема СВЧ-прибора: 1 – датчик, 2 – блок питания, 3 – электронный блок, 4 – контролируемое изделие, 5 – усилительно-согласующий блок, 6 – система контроля 1-го канала, 7 – система контроля 2-го канала, 8 – блок обработки

Датчик прибора должен обеспечивать связь СВЧ части прибора с изделием, сохраняя ее неизменность. Он включает в себя механическую часть и СВЧ схему. Вместе с тем он должен иметь возможность перестройки волноводной части для обеспечения контроля изделий разного размера.

Механическая часть представляет собой несущий корпус, крепящийся к штанге сканирующей системы, в котором находится подпружиненный шток. На штоке закреплена схема СВЧ части датчика таким образом, что обеспечивается контакт диэлектрического волновода с поверхностью изделия.

На основании проведенной работы по разработке СВЧ схемы датчика была выбрана схема, приведенная на рис. 6. Особенностью ее является наличие второго канала измерений, состоящего из металлического волновода, установленного перпендикулярно к поверхности изделия.

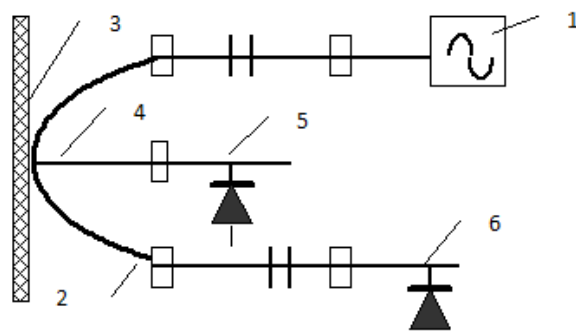


Рис. 6. Схема СВЧ части датчика: 1 – генератор СВЧ; 2 – диэлектрический волновод; 3 – контролируемое изделие; 4 – металлический волновод; 5, 6 – детектор

Работает схема следующим образом. От генератора СВЧ 1 излучение направляется в диэлектрический волновод 2, из него определенная часть попадает в контролируемое изделие 3, часть излучения попадает в металлический волновод 4. В детекторах 5 и 6 происходит детектирование электромагнитных колебаний и выделяются информативные сигналы, которые подаются в электронный блок прибора.

Для проведения экспериментальных исследований была собрана схема измерений с открытой направляющей системой (диэлектрическим волноводом) (рис. 6). В качестве генератора СВЧ колебаний использован диод Ганна типа 3А718 с длиной волны около 8 мм, схема включает в себя: вентиль волноводный типа ФВВ1-10; металлические (латунные) волноводы с внутренним размерам 7,2 x 3,4 мм, с радиусом кривизны 1,5 мм. В схеме использован детектор типа В7-27.

Оптический неразрушающий контроль (ОНК) отличается от других методов возможностью автоматизации процесса контроля, которая обеспечивается отсутствием контакта излучателя и приемника с изделием. За счет применения современных средств ОНК (излучателей и приемников), обеспечивающих высоконаправленное излучение и чувствительность – регистрацию отдельных фотонов излучения, метод может иметь высокую производительность при практически любой величине элемента разрешения. Кроме того, определяя некоторые параметры лучистого потока, такие как показатель ослабления, коэффициент прозрачности, индикатрису рассеяния и др., представляется возможным оценить качество материала в изделии как в процессе его изготовления, так и во время эксплуатации.

В настоящее время в нашей стране и за рубежом отсутствуют оптические дефектоскопы для сильнорассеивающих материалов (керамика, древесина, композиты, полимеры, пеноматериалы и др.).

Выпускаемые оптические приборы (микроскопы, измерители шероховатости и др.) обеспечивают только контроль поверхности или слоев малой толщины (доли миллиметра).

Моделируем работу датчика изменяя величину зазора между катушкой и ОК (рис. 2, 4, 5)

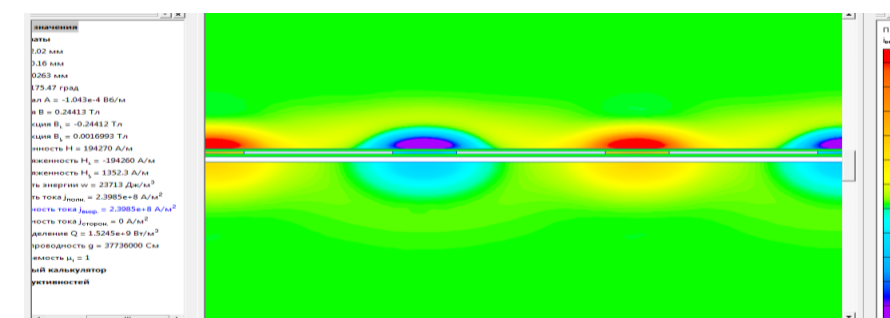


Рис. 4. Распределение вихревых токов при $h = 0,2$

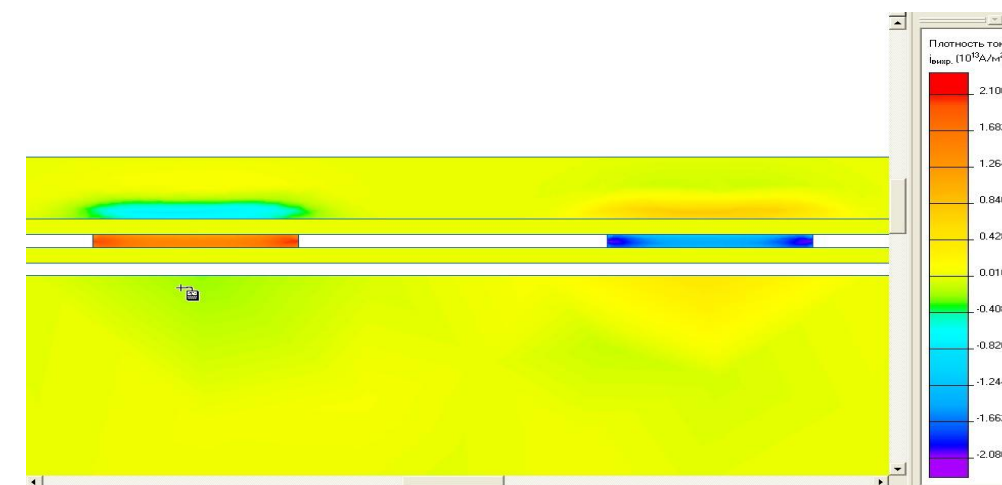


Рис. 5. Распределение вихревых токов при $h = 0,08$

Исходя из полученных при моделировании данных можно сделать выводы, что с увеличением величины зазора между контактирующей поверхностью датчика и ОК, глубина проникновения и плотность вихревых токов, наводимых в ОК, уменьшаются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арбузов, В. Н. Применение комплекса программ ELCUT для решения задач электростатики: пособие для студ. заочной формы обучения по спец. 140211 Электроснабжение / В. Н. Арбузов. – М. : МИЭЭ, 2008. – 27 с.
2. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.9. Руководство пользователя. СПб : Производственный кооператив ТОР, 2011. – 360 с.

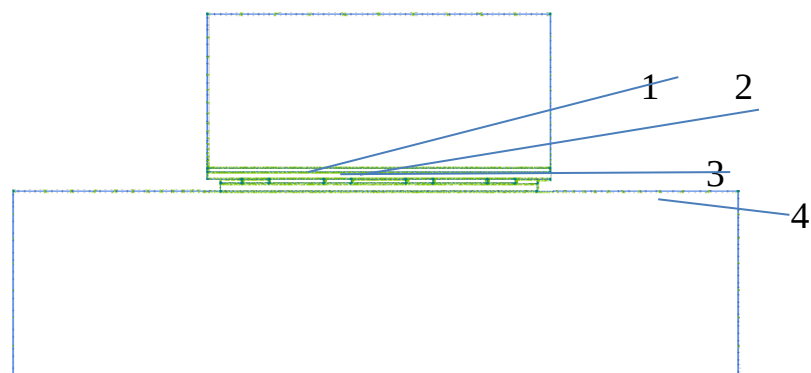


Рис. 1. Модель излучателя: 1 – стеклотекстолит; 2 – магнит; 3 – витки катушки; 4 – ОК

Известно, что величина зазора между катушкой датчика и ОК, как и проводимость материалов ОК имеет критическое влияние на плотность вихревых токов, что, в свою очередь, влияет на эффективность возбуждения поверхностных волн Рэлея.

При моделировании датчика был получен довольно неожиданный результат, представлений на рис.2.

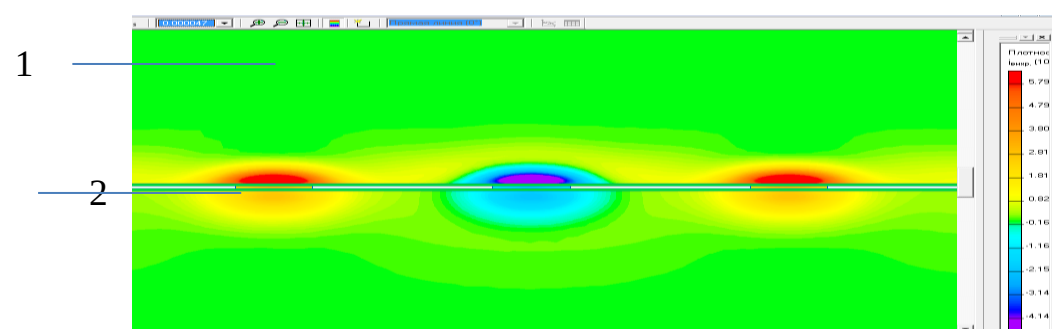


Рис. 2. Распределение вихревых токов в модели (зазор между катушкой и ОК $h=0,1$)

Как видно из результатов моделирования, из-за того, что проводимость неодимового магнита выше проводимости ОК, вихревой ток приводится в нем значительно сильнее. Во избежание этого явления целесообразно использовать экран между катушкой и магнитом, как представлено на рис. 3.

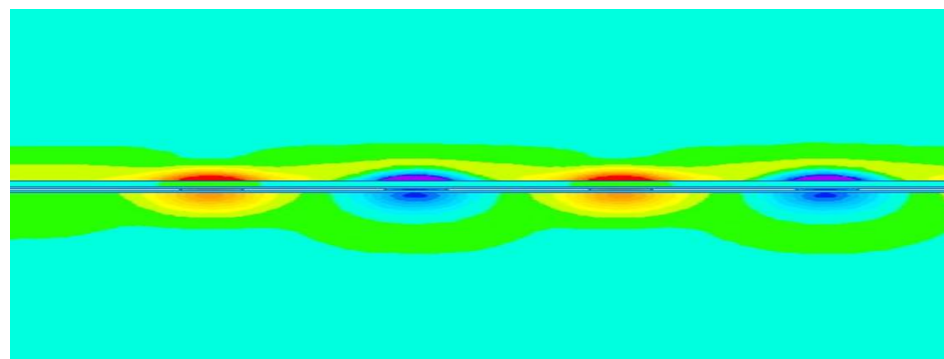


Рис. 3. ЕМА с экраном из фольги

Приемно-излучательный тракт в данных оптических приборах выполняется по классической схеме на отражение или прохождение, причем регистрируется прямо проходящий поток. Данные приборы не могут быть использованы для контроля сильно рассеивающих материалов, т.к. при их разработке не учитывались особенности этих материалов.

В результате экспериментальных исследований было установлено, что наибольшее пропускание лучистого потока вышеуказанные материалы имеют в ближнем инфракрасном диапазоне, что делает возможным осуществить дефектоскопию изделий с толщинами до 20 мм при использовании соответствующего излучательно-приемного тракта и системы обработки принятого сигнала.

В связи с этим была поставлена задача на базе разработанных требований, создать аппаратуру инфракрасного оптического неразрушающего контроля (ИОНК) изделий из сильно рассеивающих электронепроводящих материалов (кварцевая керамика, пороматериалы, композиты и др.). Причем данная аппаратура должна реализовывать двухсторонний ИОНК изделий цилиндрической, конусной и плоской форм.

Для практической реализации оптической дефектоскопии на прохождение, в Горном университете на кафедре приборостроения была разработана установка, структурная схема которой представлена на рис. 7.

В состав приемно-излучательного тракта дефектоскопа входят элементы излучателя: источник излучения, блок питания излучателя, объективы, электронный модулятор; элементы приемника: объектив с регулируемой полевой диафрагмой, фотоприемник, блок питания, генератор, измерительный усилитель.

В качестве источника излучения в приемно-излучательном тракте используется лампа накаливания или светодиод. В качестве фотоприемников используется фотоэлектронный умножитель или фотодиод. В составе структурной схемы дефектоскопа должна быть жесткая несущая штанга, на которой закрепляются излучатель и приемник.

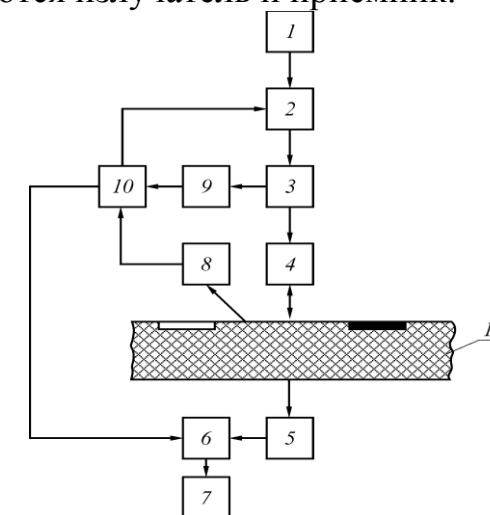


Рис. 7. Структурная схема ИК-дефектоскопа

Структурная схема дефектоскопа приведена на рис. 7. Дефектоскоп содержит источник излучения 1, затвор 2, распределительное устройство (призма) 3, оптическая система 4, приемник прошедшего излучения 5, усилитель 6, блок обработки и регистрации (компьютер) 7, приемник отраженного рассеянного излучения 8, преобразователь 9, коммутатор 10.

Система работает следующим образом. Излучение от источника 1 через затвор 2 и призму 3 попадает в оптическую систему 4, которая направляет его на изделие 11. Прошедшее сквозь изделие излучение попадает на приемник прошедшего излучения 5, где преобразуется в электрический сигнал, который поступает на усилитель 6 и далее в блок обработки и регистрации (компьютер) 7. Если рассеянное излучение отсутствует, то коммутатор 10 подключает выход приемника отраженного излучения 8 к управляющему входу усилителя 6. В этом случае отраженное от поверхности излучение попадает через призму 3 в преобразователь 9, где преобразуется в электрический сигнал и далее через коммутатор 10 на управляющий вход усилителя 6, увеличивая усиление усилителя, если отраженный сигнал увеличивается и уменьшая его, если отраженный сигнал уменьшается. Если имеется рассеянное излучение, то коммутатор 10 выход приемника отраженного излучения 8 подключает к управляющему входу затвора 2. В этом случае отраженное от поверхности излучение поступает на приемник отраженного излучения 8 и коммутатор 10 поступает на управляющий вход затвора 2, увеличивая мощность падающего потока до тех пор, пока отраженный сигнал не будет равен опорному отраженному сигналу (т.е. сигналу участка без аномалий).

Для подтверждения работоспособности предлагаемой аппаратуры были проведены испытания экспериментального образца. В результате было получено несколько дефектограмм образцов стеклопластика с заложенными дефектами. Как отмечалось выше, для получения дефектограмм можно использовать системы с построчным сканированием с записью результатов на электрохимическую бумагу, а также систему регистрации с телевизионной камерой. Выбор системы визуализации зависит от толщины контролируемого изделия. Для малых толщин можно использовать телевизионный регистратор, а для больших – систему построчного сканирования.

На рис. 8–11 приведены дефектограммы образцов стеклопластика, полученные путем построчного сканирования. Для получения дефектограммы рис. 1 использована сканирующая система качающейся развертки.

На рис. 8 приведена дефектограмма трехслойной сотовой панели из стеклопластика, полученная оптическим ИК-методом, темные участки – непроклеи сотового блока к обшивке панели. Внизу видно искусственное расслоение, прорезанное ножом.

УДК 621.179

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ ELCUT

С. В. ХОДНЕВИЧ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ УКРАИНЫ
«КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

Киев, Украина

В последнее время возрос интерес к использованию в неразрушающем контроле бесконтактных электромагнитно-акустических преобразователей (ЭМАП). ЭМАП обладает рядом преимуществ: отсутствие контактной жидкости, отсутствие предварительной подготовки поверхности объекта контроля (ОК), высокая скорость сканирования, возможность работы с объектом контроля при высокой температуре. К сожалению, из-за довольно низкого коэффициента преобразования данный тип преобразователей не нашел широкого применения [1–3].

Основным элементом ЭМАП, от которой зависит эффективность его работы, является катушка возбуждения / приема. Существует две технологии изготовления катушек: с использованием намоточных элементов и с использованием технологии изготовления печатных плат. В данной работе описывается моделирование ЭМАП с использованием проводников, изготовленных с использованием печатных технологий.

Для повышения эффективности преобразователя необходимо либо исследовать экспериментальную модель преобразователя, либо создать его математическую модель, которая достаточно точно описывает процессы, происходящие в преобразователе.

Для решения поставленной задачи может быть использован метод конечных элементов. С развитием вычислительной техники возможности метода конечных элементов постоянно расширяется и также расширяется класс решенных задач. Среди рассмотренных программных пакетов ANSYS, Comsol, ELCUT, наиболее перспективным является ELCUT. ELCUT имеет ряд преимуществ: низкую цену, бесплатную демонстрационную версию, несложный интерфейс.

На рис.1 представлена модель излучателя сделанная в ELCUT. Модель состояла из изоляционного материала – стеклотекстолит 1, магнита на основе неодимового сплава 2, ОК – алюминий 4 и катушки типа меандр со встречно направленными в соседних витках токами 3.

Совместно со специалистами БГУ разработан макет ИДС и проведена экспериментальная работа по подтверждению реализуемости заложенных решений.

Технико-экономические показатели от внедрения изделия зависят от экономических показателей принятой системы эксплуатации. Ниже приведены особенности ИДС, влияющие на экономические показатели:

- снижается время на регистрацию параметров и выполнение технологических операций по ТОиР. Снижение временных затрат на опробование двигателя самолета МиГ-29 с использованием ИДС составляет 180 с, что соответствует расходу топлива 198 кг;

- за счет автоматизации процессов и использования справочной системы уменьшается количество ошибок технического персонала;

- увеличивается глубина и повышается достоверность диагностики, за счет использования диагностической базы знаний и модулей углубленной диагностики из состава СПО;

- повышается уровень квалификации технического персонала за счет использования ИДС в режиме тренажера, справочной системы и диагностической базы знаний.

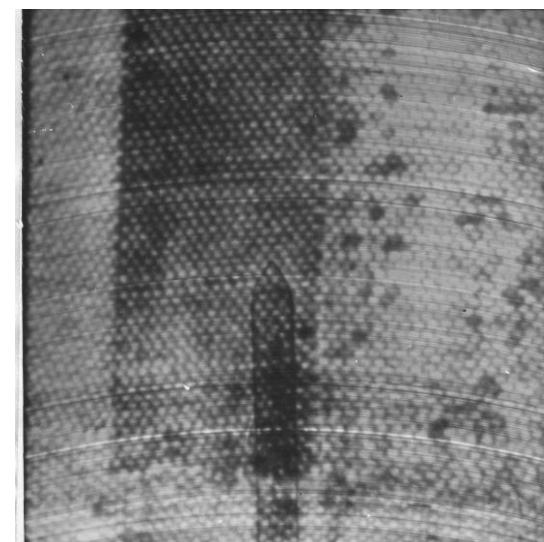


Рис. 8. Дефектограмма трехслойной сотовой панели

На рис. 9 приведена дефектограмма плиты стеклопластика толщиной 15 мм. Видны естественные складки в слоях, полученные при прессовании плиты, темные участки – повышенная пористость.

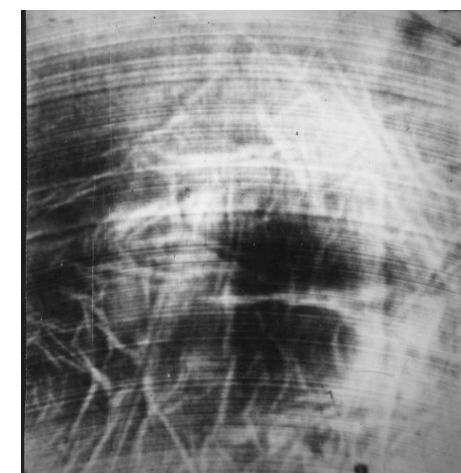


Рис. 9. Дефектограмма плиты стеклопластика

На рис. 10 приведена дефектограмма плиты из пенополистирола толщиной 25 мм, темные участки – с повышенным содержанием пор.

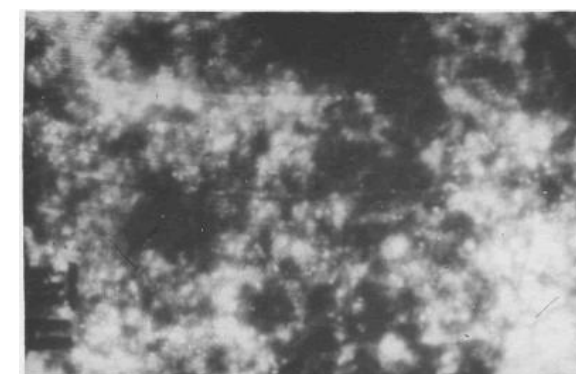


Рис. 10. Дефектограмма плиты из пенополистирола

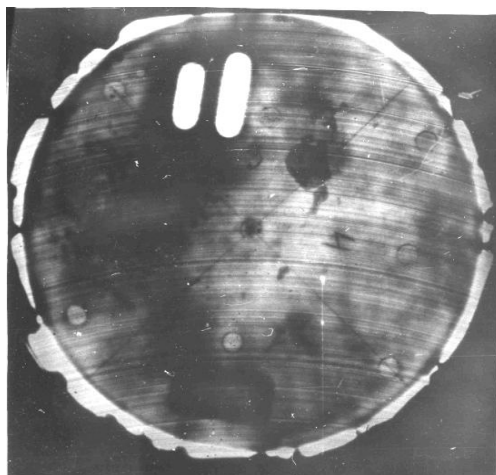


Рис. 11. Дефектограмма круглой плиты из стеклопластика

На рис. 11 приведена дефектограмма круглой плиты из стеклопластика толщиной 25 мм, полученная оптическим ИК-методом. Два светлых участка на дефектограмме обозначают отверстия в плите, темный участок рядом – зона повреждения материала при механической обработке, другие темные участки – места высокой пористости.

В основу реализации ИДС заложена интеграция разработанных БГУ системы обработки полетной информации (СОПИ) «Двина Р», универсального информационно-измерительного комплекса (ИИК) Alma Meter и разрабатываемого специального программного обеспечения (СПО). Структура аппаратной части ИДС на базе СОПИ «Двина Р» и универсального ИИК Alma Meter представлена на рисунке 2.

Взаимодействие ИДС с внешней средой осуществляется на программно-информационном и на физическом уровнях. Исходя из требований интеграции ИДС и задач информационного обеспечения диагностики, определены требования к СПО и средствам коммутации ИДС.

Подключение ИДС к ВС выполняется через штатные разъемы контроля и с помощью дополнительных датчиков. При применении ИДС для контроля различных типов ВС отличия в структуре определяются:

- различиями коммутационных жгутов;
- количеством и типами универсальных модулей;
- конфигурацией (настройками) СПО;
- модулями СПО для углубленной диагностики.

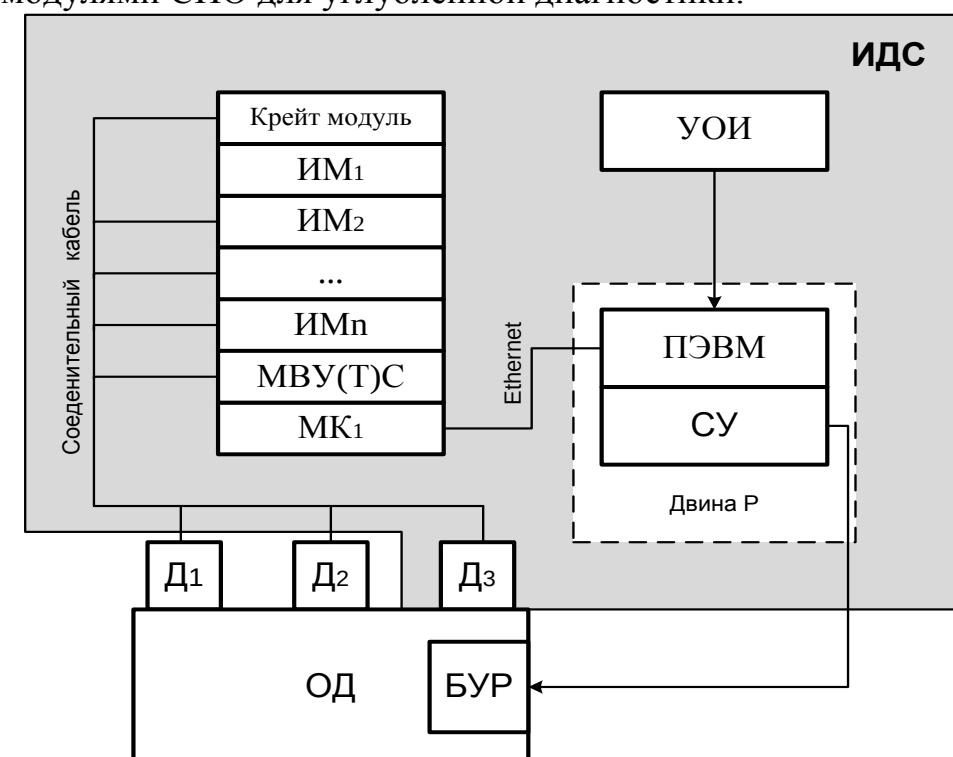


Рис. 2. Структура аппаратной части ИДС на базе СОПИ «Двина Р» и универсального измерительного комплекса Alma Meter: БУР – бортовое устройство регистрации; ИМ – измерительный модуль; МК1 – модуль коммутации; МУ(Т)С – модуль управляющих (тестовых) сигналов, СУ – согласующее устройство; ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина; УОИ – устройство отображения информации; Д1 – штатные датчики изделия; Д2 – датчики, устанавливаемые на изделие в процессе ТОиР; Д3 – дополнительные датчики ИДС

риалов и его прогноз; планирование и формирование оптимальных вариантов эксплуатации изделий;

– анализ видов, критичности и последствий отказов, анализа логистической поддержки (АЛП) и документооборота в соответствии с задачами стандартов ГОСТ 27.310, DEF STAN 00 60 («А»);

– ведение интерактивной электронной эксплуатационной документации в соответствии с ГОСТ 18675-2012 и ГОСТ 2.610 («К»).

Исходя из анализа задач ИДС обобщенная структура перспективного ИДС примет вид, представленный на рисунке 1. ИДС включает: аппаратную, программную и информационную части, реализующие описанные выше задачи.

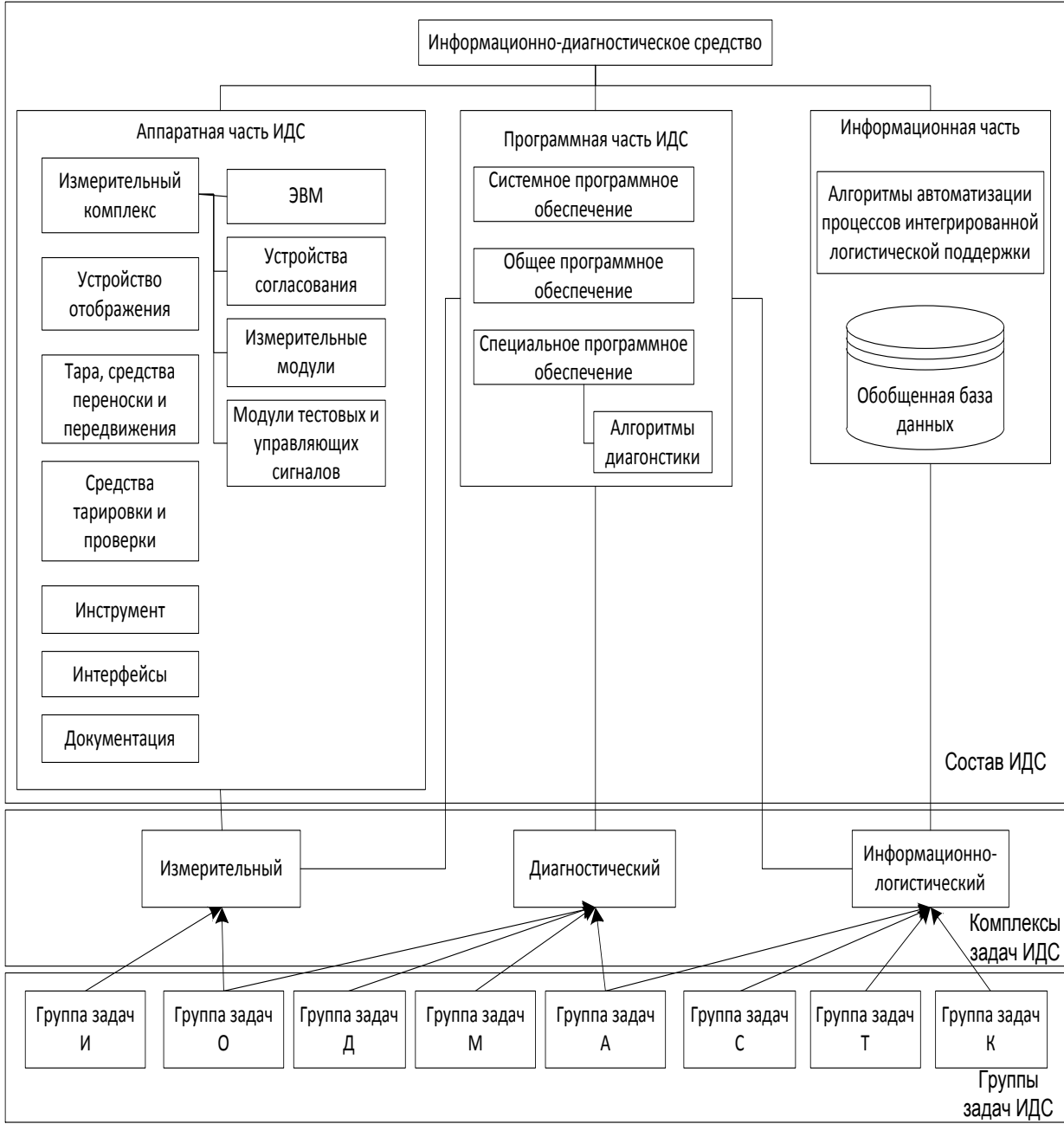


Рис. 1. Облик ИДС

УДК 378 (082)

ПЕРСПЕКТИВЫ МНОГОУРОВНЕВОЙ
ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ
ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ И ДИАГНОСТИКЕ

С. С. СЕРГЕЕВ

ГУ ВПО «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Могилев, Беларусь

В настоящее время интерес у многих работников высших учебных заведений вызывает возможность использования инновационного, опережающего развития системы высшего профессионального образования с целью формирования инновационной культуры в обществе. Это позволит повысить роль высшей школы в развитии инновационной деятельности в обществе, создать эффективные механизмы использования научно-технического потенциала в решении социальных и экономических задач, как на национальном, так и на региональном уровнях.

Инновационно-ориентированное профессиональное образование – это процесс и результат целенаправленного формирования определенных знаний, умений и методологической культуры, а также готовности специалистов к инновационной деятельности в области разработки наукоемких объектов (технологий и техники) за счет соответствующих технологий и методов обучения.

Под организацией инновационной деятельности в высшем учебном заведении можно рассматривать:

– разработку и внедрение новых перспективных наукоемких технологий, обеспечивающих выпуск продукции нового качества и неуклонный рост производительности труда в промышленности, формирование на этой основе инженерных школ, непосредственное участие в деятельности которых создает необходимые условия для воспитания технически и творчески активных специалистов;

– подготовку по индивидуальным учебным планам квалифицированных специалистов в новых областях инженерной, управленческой и экономической деятельности, внедрение в учебный процесс инновационных технологий обучения, прогнозирование и планирование инновационных процессов.

Инновационный потенциал вуза во многом определяется разнообразием форм, методов и подходов, которые использует образовательное учреждение в своей деятельности, а также степенью единства (научного, технологического, образовательного) структурных подразделений вуза. Чем больше степень интеграции основных видов деятельности вуза, тем выше его инновационный потенциал.

Разработка и внедрение новых современных методик, технологий и программ обучения должны быть нацелены, в первую очередь, на свободное развитие личности, развитие предпринимательской активности, способность быстрой адаптации к интенсивным переменам в современном мире, решение сложных профессиональных задач.

В нашем университете сформирована группа ведущих специалистов-преподавателей, силами которой проанализированы возможные пути и варианты совершенствования образовательного процесса в университете по белорусским и российским программам. На основе анализа определены направления исследований и разработок. Составлена программа по разработке и внедрению модульно-рейтинговой и кредитно-рейтинговой технологий обучения.

Разработаны, созданы и изданы образцовые учебно-методические комплексы по гуманитарному и общетехническому блокам дисциплин (электронная и бумажная версии). Разработаны концепции и научно-методические основы модульно-рейтинговой технологии обучения (МРТО). Разработаны алгоритмы контроля успеваемости студентов и расчета индивидуальных рейтингов. Для кафедр университета разработаны методические указания по оценке знаний студентов, а также графики учебного процесса. Все разработанные нормативные документы и методические рекомендации внедрены в учебный процесс по российским и белорусским образовательным программам.

В университете формируется информационный пакет образовательных программ, который, с одной стороны, обеспечит ясность и прозрачность образовательных услуг для потребителя, с другой стороны – явится эффективным инструментом управления качеством отдельных программ и управления образовательным процессом в вузе в целом.

Переход на новые сопоставимые образовательные стандарты при подготовке специалистов по российским и белорусским программам с внедрением инновационных технологий обучения и обеспечения мобильности студентов и преподавателей послужит основой для создания единого белорусско-российского образовательного пространства.

В сегодняшних условиях при подготовке специалистов высшего профессионального образования все более востребован индивидуальный подход к обучению, который обеспечивает в образовательных моделях реализацию и более широкое использование компетентностного подхода, что связано с расширением образовательного пространства в рамках реализации Болонского процесса.

Результаты образования, выраженные на языке компетенций – это путь к расширению академического и профессионального признания и мобильности, к увеличению сопоставимости и совместимости дипломов и квалификаций. В наших странах реализация компетентностного подхода может выступить дополнительным фактором поддержания единого обра-

УДК 629.7.08

ТЕХНИЧЕСКИЙ ОБЛИК СОВРЕМЕННОГО УНИВЕРСАЛЬНОГО ИНФОРМАЦИОННО-ДИАГНОСТИЧЕСКОГО СРЕДСТВА АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

С. Н. РОМАНЁНОК, Д. А. ТКАЧЁВ, К. Н. ШИШЛО
УО «МИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ВЫСШИЙ АВИАЦИОННЫЙ
КОЛЛЕДЖ»
Минск, Беларусь

Программно-аппаратные комплексы, объединенные в информационно-диагностические системы (ИДС), становятся обязательным средством наземного обслуживания авиационной техники. Разработка технического облика современного ИДС является отправной точкой для предъявления требований к приобретаемым или разрабатываемым средствам контроля авиационной техники. Под техническим обликом понимается назначение, задачи, программно-технические способы их реализации, структура изделия и порядок взаимодействия элементов изделия и взаимодействия изделия с внешней средой.

ИДС предназначено для осуществления процессов сбора, обработки, анализа, хранения и передачи информации об объекте диагностики, а также для автоматизации управления его техническим обслуживанием и ремонтом (ТОиР) и материально-техническим обеспечением (МТО). Для ИДС определены следующие группы задач:

- сбор информации («И»): регистрация параметров и построение их графиков; регистрация событий и временных затрат на диагностирование;
- обработка информации («О»): настройка измерительных каналов, определение параметров диагностических сигналов; контроль качества сбора, полноты и обработки данных; обработка статистической информации и представление ее в виде таблиц, отказов и неисправностей по функциональным системам; приведение параметров к стандартным атмосферным условиям;
- разработка диагностических моделей («М»): выбор классов состояний; формирование признакового пространства; формирование и алгоритмизация диагностических правил;
- диагностирование («Д»): анализ тенденции изменения параметров; автоматизированное выполнение контроля; автоматический контроль выполнения требований эксплуатационной документации; систематизация отказов по системам, методам их обнаружения и локализации;
- управление ТОиР («Т») и МТО («С»): нормативный контроль эксплуатации АТ; ведение общей базы данных изделий; формирование рекомендаций по устранению неисправностей; оценка фактического расхода мате-

Распределения на рис.4 (u13 и u14) рассчитаны для импульсов:

$$y = 360 / (x^2 + 0,36);$$

$$y1 = - 58 / (x^2 + 0,36);$$

$$y = - 360 / (x^2 + 0,36);$$

$$y1 = 58 / (x^2 + 0,36).$$

Величина **нулевого** (при $x = 0$) **максимума второго порядка** (одно перемещение этого участка вторым импульсом) составляет $U = 100 \text{ mV}$.

Эти распределения позволяют повысить амплитуду сигнала в два раза и осуществлять автоматическую установку нулевого уровня сигнала, за счет чего увеличивается точность измерений максимумов сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Павлюченко, В. В.** Одним импульсом / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 174 с.
2. **Павлюченко, В. В.** Неразрушающий контроль объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // Дефектоскопия. – 2010. – № 11. – С. 29–40.
3. **Павлюченко, В. В.** Неразрушающий контроль объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // Дефектоскопия. – 2010. – № 11. – С. 29–40.
4. **Фленов, М.** Библия Delphi / М. Фленов // СПб : БХВ-Петербург, 2011. – 688 с.

E-mail: es_doroshevich@mail.ru

зовательного, профессионально-квалификационного и культурно-ценностного пространства.

Разработка новых инновационных образовательных программ подготовки специалистов высшего профессионального образования требует создания и внедрения в учебный процесс учебно-методических комплексов (УМК) по дисциплинам и специальностям, что в основе своей предусматривает систематизацию всех учебно-методических документов и позволяет строить учебный процесс на прочной методической основе, системно осуществлять его практическую реализацию. Работу по созданию УМК можно рассматривать как этап большой и очень важной учебно-методической работы, направленной на дальнейшее повышение качества подготовки специалистов.

Сегодня при подготовке специалистов с высшим профессиональным образованием необходимо строить учебный процесс так, чтобы он был максимально приближен к будущей практической деятельности выпускников, в значительной степени ориентирован на конкретные нужды производства. Вузы должны уделять больше внимания и выделять больше учебного времени в своих рабочих учебных планах для практической подготовки студентов за счет часов, отводимых на производственную практику и научно-исследовательскую работу. Перспективной видится ситуация, при которой часть курсовых и дипломных проектов будет выполняться по заказам предприятий и организаций-потребителей выпускников вузов. Желательно, чтобы при выполнении курсовых и дипломных проектов – студенты различных направлений и специальностей (а по возможности студенты различных вузов) объединялись бы в творческие и рабочие группы. Вся работа над такими «комплексными» проектами должна быть направлена на получение конкретного конечного результата и проводиться в рамках научно-исследовательских работ, финансируемых промышленными предприятиями и организациями, на которых в дальнейшем будут работать молодые специалисты. Безусловно, эта проблема очень сложная с точки зрения решения организационных и правовых вопросов.

Такую форму подготовки специалистов на заключительном этапе обучения можно рассматривать и как подготовку научно-педагогических кадров путем трансформации результатов курсовых и дипломных проектов в диссертации на соискание ученой степени магистра и кандидата технических наук.

Высшая школа в последние годы пытается осуществить переход от информативной системы обучения к проблемной, в основе которой лежит самостоятельная работа студентов под руководством преподавателя. Меняется и роль преподавателя: он становится наставником и консультантом. Основной его задачей становится мотивация студентов к инновационной деятельности. Следовательно, еще одна особенность образовательной деятельности вуза заключается в том, чтобы обеспечить студентам возмож-

ность интенсивно трудиться, ибо без этого невозможно стать полноценным специалистом.

Под интенсификацией обучения понимается повышение эффективности работы каждого студента, увеличение объема усвоения учебного материала без увеличения учебного времени, тщательный отбор наиболее эффективных заданий для активизации материала, уплотнение аудиторных занятий, поиск методов стимулирования интереса студентов к изучению предмета.

Увеличение доли самостоятельной работы студента требует соответствующей реорганизации учебного процесса, модернизации учебно-методической документации, разработки новых дидактических подходов для глубокого самостоятельного освоения учебного материала. Самостоятельная работа должна носить продуктивный характер, способствовать развитию творческого потенциала студента, обязательно быть направлена на самостоятельный индивидуальный поиск способов решения проблемных ситуаций.

При переходе на двухуровневую подготовку вузы России уже имеют большой опыт в подготовке бакалавров и магистров, которая началась еще в 1995 году, однако данная система является чисто формальной. Вузы выдают дипломы бакалавров, но, не выпуская их на рынок труда, продолжают массовое обучение на квалификацию «специалист», и лишь единицы получают квалификацию «магистр», и это только те, кто планирует в дальнейшем поступить в аспирантуру и работать либо в науке, либо в высшей школе. С переходом на двухуровневую систему подготовки ситуация на рынке труда изменится кардинально, и это ставит вопросы перед всеми участниками процесса: студентами, работодателями, вузами.

При подготовке специалистов в области неразрушающего контроля в нашем вузе учебный процесс строится на методической базе, основанной на принципе системности и деятельном подходе. При этом деятельный подход позволяет дать четкие ответы на вопросы форм и необходимости обучения, т.е. учить надо для того, чтобы человек мог выполнять вполне определенную деятельность; учить надо тому, что необходимо для успешного выполнения этой деятельности. На основе деятельного подхода перед студентами формируется конкретный набор задач, с которыми он может встретиться и которые он должен уметь успешно решать. При этом имеются две категории наборов задач - промежуточные и итоговые. Промежуточные требования при изучении отдельных дисциплин. Итоговые выражают требования к умениям выпускника к моменту завершения обучения и носят комплексный обобщающий междисциплинарный характер. Уровень подготовленности выпускников к профессиональной деятельности проверяется в процессе государственного экзамена по специальности.

Серьезное внимание в учебном процессе уделяется развитию творческих способностей будущих инженеров. Достижение этой цели обеспечи-

$$u_{13} = u_{18} + (y_1 - 30) (-u_{18} + 20) / 90; 0,6 < x < 0,917; -0,917 < x < -0,6.$$

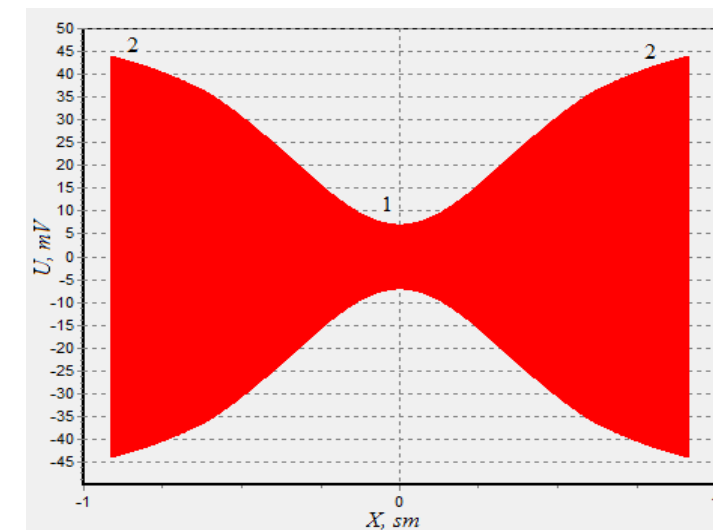


Рис. 3. Зависимость U от x

Здесь y и y_1 – величина H первого прямого и второго обратного импульсов, выраженная в A/sm . Индуктор расположен на высоте $0,6\text{ m}$ над МН и его проекция соответствует $x=0$. Величина **нулевого** (при $x=0$) **минимума первого порядка** (перемагничивания этого участка в противоположном направлении не было) составляет $U=14\text{ mV}$.

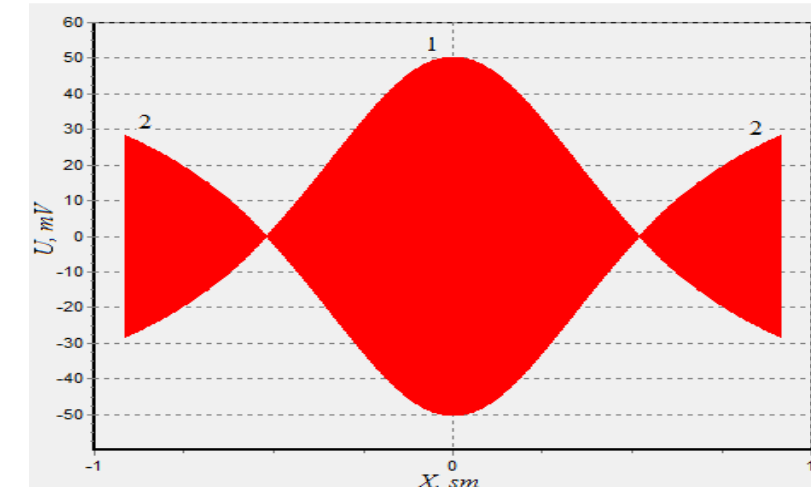


Рис. 4. Зависимость U от x

Распределения на рис.3 (u_{13} и u_{14}) рассчитаны аналогично для импульсов: $y = 360 / (x^2 + 0,36)$;

$$y_1 = -36 / (x^2 + 0,36);$$

$$y = -360 / (x^2 + 0,36);$$

$$y_1 = 36 / (x^2 + 0,36).$$

Величина **нулевого** (при $x = 0$) **максимума второго порядка** (одно перемагничивание этого участка вторым импульсом) составляет $U= 10\text{ mV}$. Суммарное изменение величины первого максимума составляет $U= 24\text{ mV}$.

Программное обеспечение теоретических расчетов проведено с помощью программного языка Delphi [4] с осуществлением операций: выбор $U = U(H)$ для МН, определение параметров импульсов, расчет воздействия ими на МН с получением прямых и обратных временных зависимостей $U = U(t)$, перевод $U = U(t)$ в $U = U(x)$ по координате считывания x , повторение указанных операций в присутствии объекта, сравнение распределений $U = U(x)$ и определение свойств объекта. На рис.2–4 показаны расчетные зависимости величины U , снимаемого с МГ, от расстояния x до проекции оси линейного излучателя. На МН воздействовали двумя импульсами.

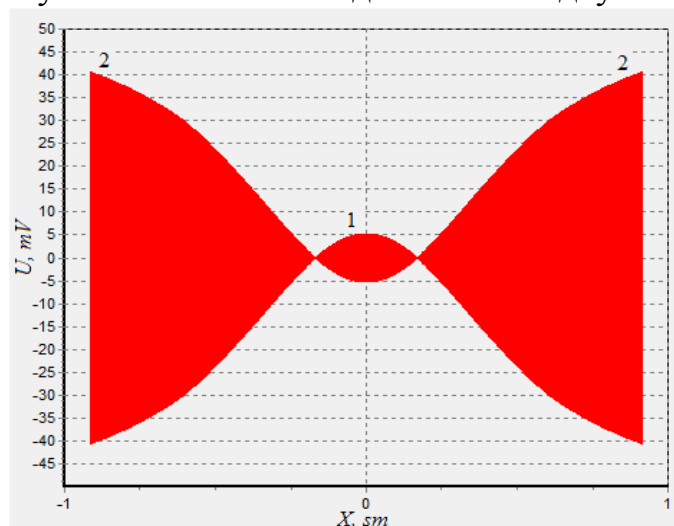


Рис. 2. Зависимость U от x

Распределения U , изображенные на рис.2 (u13 и u14), рассчитаны для импульсов $y = 360 / (x^2 + 0,36)$; $y_1 = -30 / (x^2 + 0,36)$. Использована экспериментальная функция u6 градуировочной зависимости $U = U(H)$ преобразователя из МН:

$$u6 = 54 + 0,006 (y - 500);$$

$$u19 = 0,8125 u6;$$

$$u14 = u19 + (y_1 + 30) (u19 + 20) / 90 \text{ в интервалах } 0 < x < 0,6; -0,6 < x < 0;$$

и экспериментальная функция u5 градуировочной зависимости:

$$u5 = 50 + 0,02 (y - 300);$$

$$u18 = 0,8125 \cdot u5;$$

$$u13 = u18 + (y_1 + 30) \cdot (u18 + 20) / 90; 0,6 < x < 0,917; -0,917 < x < -0,6.$$

Аналогично получены зеркальные изображения распределений:

$$y = -360 / (x^2 + 0,36);$$

$$y_1 = 30 / (x^2 + 0,36);$$

$$u6 = -54 + 0,006 (y + 500);$$

$$u19 = 0,8125 \cdot u6;$$

$$u14 = u19 + (y_1 - 30) \cdot (-u19 + 20) / 90; \text{ в интервалах } 0 < x < 0,6; -0,6 < x < 0;$$

$$u5 = -50 + 0,02 (y + 300);$$

$$u18 = 0,8125 \cdot u5;$$

вается соответствующей технологией обучения. Поэтому переход к решению субъективно творческих задач должен осуществляться постепенно, по мере повышения образовательного потенциала студентов. На старших курсах введена дисциплина «Учебно-исследовательская работа студентов», в рамках которой студенты осваивают элементы научных исследований: постановка задачи, анализ, синтез, теоретическое моделирование, планирование эксперимента. Программы лабораторных работ предусматривают постановку задачи и самостоятельное проведение экспериментов с обработкой результатов.

В учебном процессе широко используются современные образовательные методики и технологии: комплекс контрольно-обучающих программ по специальным дисциплинам; система организации самостоятельной работы студентов по различным дисциплинам; экспертная система для проведения государственного экзамена; система автоматизированного технического проектирования и др.

В докладе рассмотрена проблема компетентного подхода при реализации учебного процесса в соответствии с новыми образовательными стандартами для подготовки специалистов по неразрушающему контролю и диагностики. Приведены структура и сравнительный анализ учебных планов белорусских и российских образовательных программ.

УДК 620.179.16

РАССЕЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН РЭЛЕЯ
ТРЕЩИНОПОДОБНЫМ ДЕФЕКТОМ НОРМАЛЬНЫМ
К ПОВЕРХНОСТИ УПРУГОГО ТЕЛА

К. Е. АББАКУМОВ, Р. С. КОНОВАЛОВ
ФГБОУ ВПО «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «ЛЭТИ»
Санкт-Петербург, Россия

Одним из известных типов звуковых волн распространяющихся на свободной границе твердого тела являются волны Рэлея [1]. Данный тип волн хорошо изучен и широко применяется в практике ультразвуковой дефектоскопии. При их использовании для обнаружения дефектов, выходящих на поверхность объекта или залегающих на небольшой глубине, весьма полезны количественные оценки коэффициентов отражения и прохождения этих волн в случаях пограничных дефектов различных форм и размеров. По данным металлографических исследований трещиноподобные дефекты, встречающиеся в различных объектах, могут отличаться заметным разнообразием своего строения. В частности, отмечается образование дефектов типа стресс-коррозии или слипания, в которых отдельные участки поверхностей трещин могут взаимодействовать друг с другом. В связи с этим существует необходимость учета распространения акустических волн вдоль трещины, образованной множеством выступов и впадин микрорельефа. Данная задача может быть решена в рамках модели «нежесткого» соединения в приближении «линейного скольжения» [2, 3].

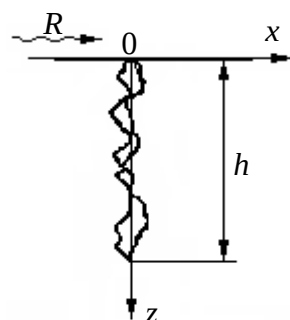


Рис. 1. Модель трещины

В данной работе рассматривалось упругое изотропное полупространство со свободной от напряжений гладкой поверхностью с нормальной трещиной глубиной h , по которой распространяется волна Рэлея (R на рис. 1). Аналогично в работе [4] определение компонент рассеянного поля волны Рэлея на трещиноподобном дефекте было построено на основе решения однородных уравнений Гельмгольца путем представления смеще-

УДК 620.130

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕТОДА ГИСТЕРЕЗИСНОЙ
ИНТЕРФЕРЕНЦИИ В ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

В. В. ПАВЛЮЧЕНКО, Е. С. ДОРОШЕВИЧ
«БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Минск, Беларусь

Целью работы является развитие метода гистерезисной интерференции (НИ) для контроля объектов, повышающего точность определения их электрических и магнитных свойств, толщины, геометрических параметров и параметров дефектов сплошности в них. Явление (НИ) заключается в возникновении упорядоченных максимумов и минимумов распределений остаточной намагниченности магнитного носителя (МН) в результате воздействия на него импульсами магнитного поля [1–3]. Сканирование МН осуществляли индукционной магнитной головкой (МГ), выход которой был подключен к входу цифрового осциллографа, соединенного с монитором. Измеряли величину электрического напряжения U , индуцированного МГ. Измерения проведены в диапазоне напряженности H магнитного поля $1 \cdot 10^2$ – $1 \cdot 10^5$ А/м при времени нарастания поля от $1 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-4}$ с. На рис. 1 представлено экспериментальное распределение U на выходе МГ, полученное в результате воздействия на МН двумя последовательными импульсами магнитного поля линейного индуктора разной полярности и амплитуды. По величине максимумов и минимумов этого распределения, а также по величине сигнала в каждой точке можно с высокой точностью определять указанные свойства объекта сразу на значительной площади его поверхности. При этом распределения $U = U(t)$ соответствуют мгновенным распределениям $H = H(t)$, где t – время развертки.

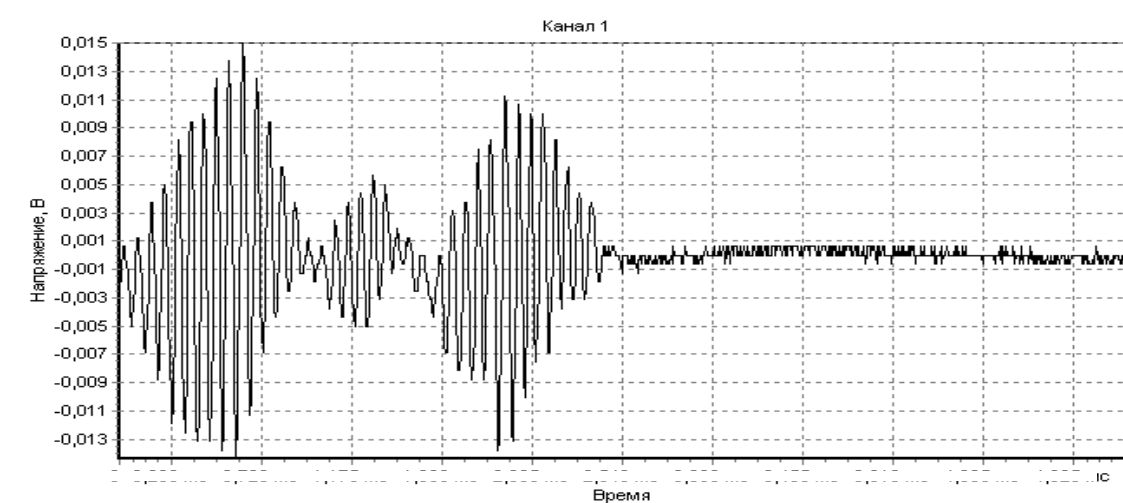


Рис. 1. Зависимость $U(t)$, воспроизведенная индукционной МГ: воздействие на МН двумя разнополярными импульсами поля с разными амплитудами

Целью данной модели являлось определение центральных углов проточки, при которых сигнал от ВТП уменьшится на 10 % относительно сигнала при центральном угле дефекта в 360°.

В результате моделирования был получен набор годографов на комплексной плоскости дифференциального сопротивления элемента МНП для проточек с центральными углами (360°, 120°, 110°, 100°, 90°, 80°, 70°, 60°). Значения амплитуд годографов для каждой из них представлены в табл. 1. Под амплитудой годографа понимается расстояние от начала координат до наиболее удаленной от него точки годографа.

Расчет показал, что сигнал от ВТП уменьшается на 10 % относительно сигнала при центральном угле дефекта в 360° при $\beta \approx 95^\circ$. То есть для охвата всего периметра цилиндрического объекта контроля вихревыми токами МНП должен состоять из четырех одноэлементных ВТП.

Табл. 1. Значение амплитуд годографов для различных центральных углов проточки

$\beta,^\circ$	360	120	110	100	90	80	70	60
Амп.,Ом	0,8841	0,8629	0,8436	0,8137	0,7702	0,7081	0,6220	0,5127
$\delta, \%$	0	2,4	4,6	8,0	12,9	19,9	29,7	42,0

Результаты конечно-элементного моделирования были использованы при разработке многоэлементного вихретокового преобразователя для контроля дисперсионных тепловыделяющих элементов [5]. Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с данными экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Герасимов, В. Г.** Неразрушающий контроль: кн. 3. Электромагнитный метод / В. Г. Герасимов, А. Д. Покровский, В. В. Сухоруков. – М., 1992.
2. **Лунин, В. П.** Проходной многоэлементный вихретоковый преобразователь / В. П. Лунин, А. Д. Покровский, В. В. Чегодаев // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов : материалы 2-й Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2006. – С. 71–73.
3. **Чегодаев, В. В.** Оценка эффективности вихревых токов при проектировании многоэлементного преобразователя для контроля парогенераторных труб / В. В. Чегодаев, В. П. Лунин, А. С. Крюков // Вестн. МЭИ. – 2013. – № 4. – С. 90–94.
4. **Лунин, В. П.** Метод конечных элементов в задачах прикладной электротехники / В. П. Лунин. – М., 1996.
5. Обработка сигналов многоэлементного преобразователя при вихретоковом контроле тепловыделяющих элементов реакторов АЭС / А. С. Крюков [и др.] // Вестн. «МЭИ». – 2013. – № 4. – С. 95–100.

Е-mail: sasa-mail@inbox.ru
chegodaevvv@gmail.com
valery.lunin@mtu-net.ru
zhdanov.andrew82@gmail.com

ний в виде симметричной (s) и антисимметричной (a) компонент с последующей их сборкой в четверти $x \geq 0, z \geq 0$. Граничные условия для данных составляющих, можно представить в следующем виде для симметричных:

$$\sigma_{xz}^s = KGT[U_z^s(0^+, z) - U_z^I(0^-, z)], \quad 0 \leq z < h \quad (1)$$

$$\sigma_{xx}^s = 0, \quad 0 \leq z < \infty \quad (2)$$

$$U_z^s(0, z) = 0, \quad h \leq z < \infty \quad (3)$$

и антисимметричных компонент:

$$\sigma_{xx}^a = KGN[U_x^a(0^+, z) - U_x^I(0^-, z)], \quad 0 \leq z < h \quad (4)$$

$$\sigma_{xz}^a = 0, \quad 0 \leq z < \infty \quad (5)$$

$$U_x^a(0, z) = 0, \quad h \leq z < \infty, \quad (6)$$

где I – индекс, соответствующий падающей волне. Данные граничные условия отражают наличие адгезионной связи между гранями трещины: неполная передача компонент смещений при наличии контактной нормальной KGN или тангенциальной KGT жесткостей [3] – (1, 4); отсутствие соответствующих симметричных или антисимметричных составляющих напряжений вдоль трещины – (2, 5); отсутствие соответствующих симметричных или антисимметричных компонент смещений вне пределов трещины по оси z – (3, 6). Для обоих случаев верно условие об отсутствии компонент напряжений на свободной поверхности полупространства:

$$\sigma_{xx}^{a,s} = 0, \quad z = 0, x \geq 0$$

$$\sigma_{xz}^{a,s} = 0, \quad z = 0, x \geq 0.$$

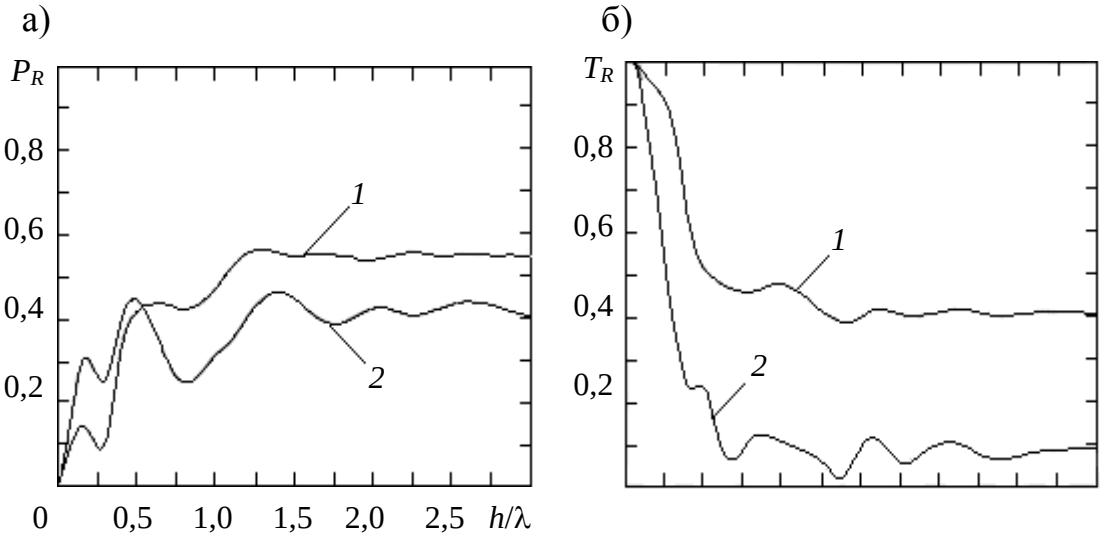


Рис. 2. Зависимости коэффициентов отражения (а) и трансформации (б) поверхностной волны для алюминия

Коэффициенты отражения и трансформации поверхностной волны определялись с использованием принципа взаимности [1]. Их численные

оценки приведены на рис. 2, 3 для алюминия. Так на рис. 2 приведены зависимости коэффициентов отражения (a) и прохождения (b) волны Рэлея в зависимости от нормированной глубины трещины при $KG_N = 1,5 \cdot 10^{14} \text{ Н/м}^3$ (кривые 1 на рис. 2, a, b), а также – для случая открытой трещины (кривые 2 на рис. 2 a, b). Так из рис. 2 видно, что при значениях $h/\lambda > 0,5$ коэффициент отражения частично закрытой трещины больше, чем – для открытой. Изучение переданных и преобразованных волн показывает, что это связано с энергией процесса. Фактически частично закрытая трещина с данными нормальными жесткостями передает энергию падающего потока лучше, чем открытая трещина для всех значений нормированных глубин. Подобное обстоятельство – частое явление на практике, при определении параметров амплитуды рассеянных волн на дефектах типа “слипание”, приводящее к неоднозначности результатов измерений.

Следует отметить, что сопоставление результатов численного решения для случая открытой трещины в рамках предложенной модели, показало соответствие с данными известных из литературы теоретических и экспериментальных исследований. Так, например, сравнение результатов с данными работы [5] показало наличие качественного и количественного сходства, что подтверждает корректность использования модели.

В заключение отметим, что представленные данные могут найти применение в ультразвуковой дефектоскопии при разработке методик и выборе параметров контроля изделий, содержащих поверхностные дефекты с контактными границами (например, стресс-коррозионные трещины, слипание и др.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Викторов, И. А.** Звуковые поверхностные волны в твердых телах / И. А. Викторов. – М. : Наука, 1981.
2. **Аббакумов, К. Е.** Распространение волны Рэлея вдоль границы твердого тела с трещиной / К. Е. Аббакумов, В. А. Бритвин, Р. С. Коновалов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2009. – № 2. – С. 57–64.
3. **Аббакумов, К. Е.** О рассеянии поверхностных волн Рэлея трещиноподобным дефектом, нормальным к поверхности упругого полупространства / К. Е. Аббакумов, Р. С. Коновалов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2012. – № 1. – С. 74–80.
4. **Achenbach, J. D.** Elastodynamic analysis of an edge crack / J. D. Achenbach, L. V. Keer, D. A. Mendelsohn // Journ. of Appl. Mech. – 1980. – V. 42. – P. 551–556.
5. **Данилов, В. Н.** К вопросу о рассеянии поверхностных волн Рэлея на пограничных дефектах / В. Н. Данилов, В. С. Ямщиков // Акустический журн. – 1985. – Т. 31. – № 3. – С. 323–327.

В статье [3] представлен способ расчета необходимого числа одно-элементных ВТП для случая, когда контролируемую поверхность можно считать плоской по отношению к элементу МНП. Но при контроле изделий с малыми радиусами кривизны данное допущение может привести к значительной погрешности, поэтому в таком случае необходимо учитывать геометрию ОК. Конечно-элементное моделирование [4] – наиболее простой, быстрый и наглядный способ решения подобных задач.

Исследуемый в работе цилиндр состоит из двух слоев: диаметр внешнего слоя – 6,8 мм, его электрическая проводимость – 2,440 МСм/м, диаметр внутреннего слоя – 5,8 мм и его проводимость – 6,452 МСм/м. Для определения необходимого числа элементов МНП была построена конечно-элементная модель в программном пакете *Comsol Multiphysics*. В качестве дефекта использовалась проточка с центральным углом β на поверхности внутреннего слоя (рис. 2). Местоположение проточки в ОК относительно элемента МНП оставалось неизменным. Центр дефекта всегда располагался под краем ферритового сердечника одной из катушек с дальней стороны относительно второй катушки (рис. 3). Также дефект имел постоянные размеры $d = w = 0,5 \text{ мм}$, а в процессе моделирования изменялся лишь центральный угол проточки. Плотность тока в катушке задавалась равной 1 А/мм^2 , частота тока – 60 кГц.

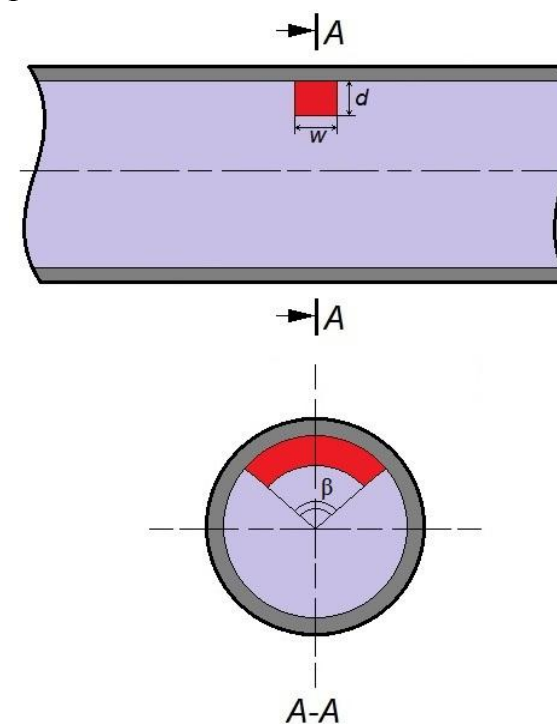


Рис. 2. Внешняя проточка с центральным углом β

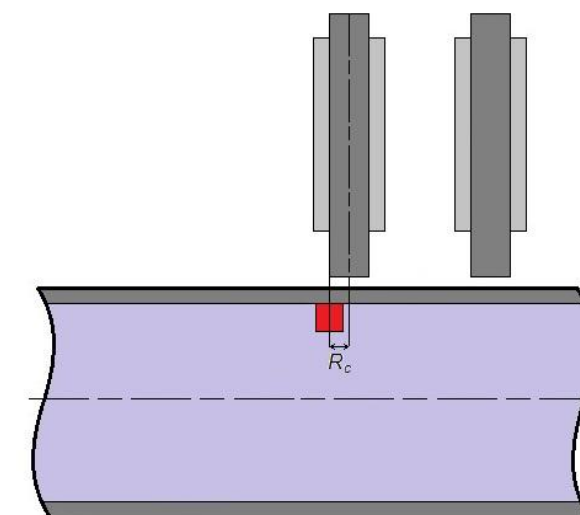


Рис. 3. Взаимное расположение проточки и ВТП (R_c – радиус сердечника)

УДК 620.179

РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ЭЛЕМЕНТОВ МАТРИЧНОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ВИХРЕТОКОВОМ
КОНТРОЛЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

А. С. КРЮКОВ, В. В. ЧЕГОДАЕВ, А. Г. ЖДАНОВ, В. П. ЛУНИН
ФГБОУ ВПО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»
Москва, Россия

Контроль неоднородности электропроводящих материалов многослойных цилиндрических изделий – одна из распространенных задач вихретоковой дефектоскопии [1]. Отбраковка изделий осуществляется по степени неоднородности материала одного или нескольких слоев. В частности, неоднородность проводящего материала может определяться наличием дефектов в виде пустот. Причем форма таких дефектов не имеет значения, а важен его объем и местоположение в сечении изделия. Доступ к объекту контроля (ОК), в большинстве случаев, возможен только с внешней стороны, поэтому для выявления, локализации и оценки объема дефектов было предложено использовать многоэлементный накладной вихретоковый преобразователь (МНП) [2]. Каждый из элементов МНП (рис. 1) является дифференциальным и включает в себя две одинаковые катушки, намотанные на ферритовые сердечники. Число витков в каждой равно 150, а относительная магнитная проницаемость материала сердечников – 1000. При проектировании преобразователя такого типа очень важным является расчет необходимого числа одноэлементных вихретоковых преобразователей (ВТП), входящих в состав многоэлементного. Число элементов должно быть таким, чтобы суммарная зона контроля всех ВТП была равна длине окружности, образующей поверхность цилиндрического объекта. Превышение необходимого числа приведет к усложнению системы контроля и снижению ее производительности.

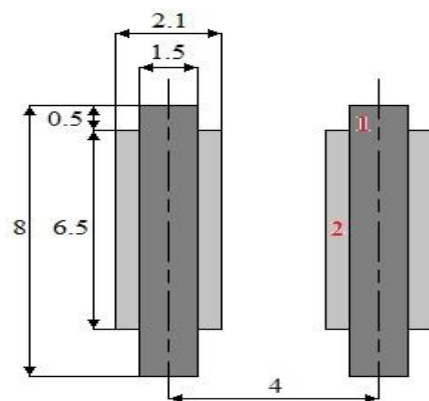


Рис. 1. Один из элементов МНП

УДК 669.162.212

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ФУТЕРОВКИ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

А. М. АРЗАМАСЦЕВ, * А. Ю. ЛЕДНОВ, ** А. В. ПОПОВ,
* Г. Ю. САВЧЕНКО, * Ю. И. САВЧЕНКО

ООО «ДМА»

* ФГБОУ ВПО «МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Г. И. Носова»

** ООО «ЕвроСтандарт»

Магнитогорск, Россия

Доменная печь – непрерывно действующий агрегат шахтного типа, течение процесса в котором основано на противотоке шихтовых материалов и горячих газов. Профиль доменной печи (рис. 1), ограничивающий ее рабочее пространство, так называемый «полезный объем», является важнейшей частью конструкции печей. Создание рационального профиля позволяет достичь устойчивого режима работы (ровного хода) доменной печи. Условия ровного хода достигаются строго регламентированным технологическим графиком производства – от складирования шихтовых материалов и загрузки их в печь до выпуска продуктов плавки, четкой работы оборудования в соответствии с правилами технической эксплуатации, техники безопасности и организации производства. Несоблюдение технологии приводит к существенным изменениям в профиле доменной печи: возникновению в огнеупорной кладке (футеровке) выбоин, разгаров профиля и образованию настывлей. Выбоины и неравномерный разгар профиля приводят к развитию периферийного хода, что отражается на устойчивости работы доменной печи. Особенно отрицательно на ровности хода сказывается образование настывлей.

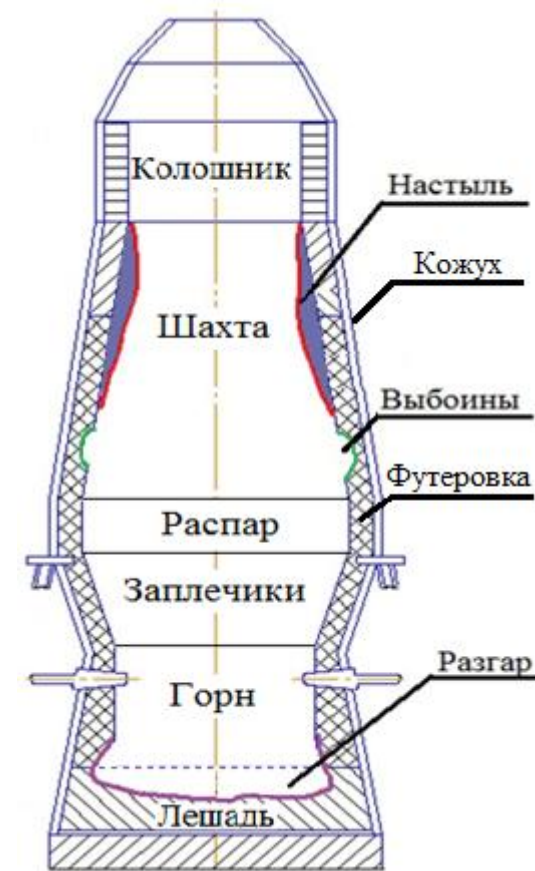


Рис. 1. Профиль доменной печи

Поскольку восстановить профиль доменной печи весьма сложно, возрастает роль контроля состояния футеровки. Для диагностики состояния слоев футеровки предложено множество методов [1].

Теплотехнический метод – заключающийся в построении математической модели температурного поля внутри доменной печи. Для реализации этого метода проводят контроль тепловых нагрузок на холодильники, закладку термопар в кладку доменной печи, контроль температуры кожуха доменной печи.

Радиационный метод – для реализации метода производится закладка радиоактивных изотопов в кладку доменной печи и по радиоактивному излучению чугуна судят о том, какие блоки разрушились.

Аналитический метод – для обеспечения работоспособности метода контролируют материальный и тепловой баланс доменного процесса.

Метод *взятия керн*а – производят бурение кладки доменной печи, в процессе бурения измеряют температуру. По результатам анализа керн а и температурам судят об износе футеровки доменной печи.

Применение этих методов предполагает определенные мероприятия ещё при строительстве домны.

В последнее время все больший интерес вызывают акустические методы контроля. Основные проблемы, возникающие при использовании эхо-методов – многослойность кладки, высокое затухание, большие температурные градиенты, изменение физических свойств материалов футеровки при воздействии высоких температур и агрессивной среды. В [2] приведены результаты сравнения эхо-метода с результатами анализа кернов.

В 2005 г. была предложена резонансная методика диагностики состояния футеровки. Согласно модели доменная печь представляет собой многослойную структуру с различными толщинами и акустическими свойствами. При нарушении целостности футеровки возникают новые слои, а при разрушении слои исчезают. Каждый слой можно характеризовать входным импедансом слоя $Z_{\text{вх}}$ [3], величина которого зависит от импедансов среды Z_1 и слоя Z_2 и набега фазы акустической волны в слое, которая, в свою очередь, определяется толщиной слоя d и скоростью волны c_2 .

$$Z_{\text{вх}} = Z_2 (Z_1 - iZ_2 \operatorname{tg}(\omega d/c_2)) / (Z_2 - iZ_1 \operatorname{tg}(\omega d/c_2)). \quad (1)$$

При наличии большего числа слоев, применяя формулу (1) для каждого слоя, рассчитывается коэффициент пропускания слоистой структуры. Зависимость коэффициента пропускания от частоты звука носит резонансный характер. Значения частот, при которых наблюдаются максимумы, соответствуют установлению стоячих акустических волн в слоях.

На рис. 2 приведены расчетный и экспериментальные спектры колебаний на кожухе доменной печи. Наличие в экспериментальном спектре множества дополнительных, по сравнению с расчетным, резонансных частот говорит о наличии акустических шумов. Основные пики соответствуют характерным размерам слоев футеровки. Методика была апробирована на предприятиях России, Украины и Дальнего зарубежья.

Уменьшение межполюсного расстояния также снижает влияние зазора на характер намагничивания: при зазоре в 1 мм и межполюсном расстоянии $X_0 = 40$ мм плотность магнитного потока в поверхностном слое объекта под центром межполюсного пространства составляет 0,21 Тл, а при $X_0 = 25$ мм – плотность потока равна 0,41 Тл.

Следует отметить, что в настоящее время в коэрцитиметрии наиболее часто используются датчики с $X_0 > Y_0$. Типичные размеры электромагнитов (сечение полюса, межполюсное расстояние): 4x10 мм, 15мм; 5x15 мм, 25 мм; 12x28 мм, 32 мм. Как следует из приведенных выше результатов, при таких типоразмерах электромагнитов межполюсная зона объектов намагничивается недостаточно и показания коэрцитиметров зависят не только от свойств и объема, но и местоположения магнитных неоднородностей, находящихся в околополюсном и межполюсном пространстве. Учитывая, что при $X_0 < Y_0$ межполюсная зона ферромагнитного объекта намагничивается до существенно более высоких значений как при контактном намагничивании, так и при наличии зазора в магнитной цепи, целесообразно с помощью встречно направленных наконечников уменьшать межполюсное расстояние приставных электромагнитов для обеспечения необходимой чувствительности к свойствам всей межполюсной зоны контролируемого объекта.

Работа выполнена при поддержке гранта РЦП-14-П2 и гранта 12-П-2-1031 программы Президиума РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моделирование пространственного распределения поля и индукции в локально намагничиваемых массивных объектах и оптимизация конструкции П-образных преобразователей / В. Н. Костин [и др.] // Дефектоскопия. – 2010. – № 6. – С. 13–21.
2. Костин, В. Н. Локальное измерение индукции коэрцитивного возврата при наличии зазора в составной цепи «преобразователь-объект» / В. Н. Костин, О. Н. Василенко // Дефектоскопия. – 2012. – № 7. – С. 3–14.
3. Пат. 2483301 РФ, МПК⁷ G 01 N 27/72. Способ локального измерения коэрцитивной силы ферромагнитных объектов [Текст] / В. Н. Костин, О. Н. Василенко; заявитель и патентообладатель ИФМ УрО РАН. – № 2011147435/28; заявл. 22.11.11; опубл. 27.05.13, Бюл. № 15. – 12 с.
4. Параллельные вычисления в УрО РАН. Запуск программ из пакета ANSYS. URL: <http://www.parallel.uran.ru/node/264>.

E-mail: kostin@imp.uran.ru
vasilenko@imp.uran.ru

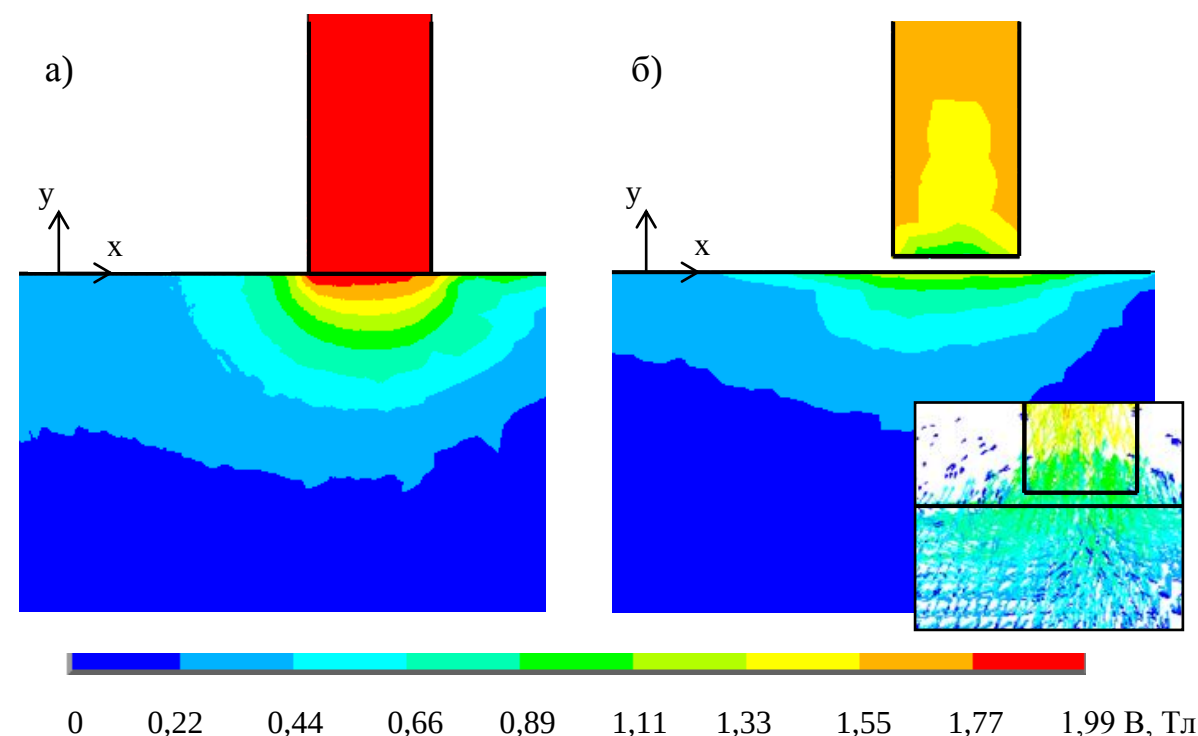


Рис. 1. Магнитная индукция (плотность магнитного потока) в массивной плите из динамной стали с размерами 300x230x84 мм, намагничиваемой электромагнитом с сечением полюсов 10x28 мм и межполюсным расстоянием 40 мм, при нулевом зазоре между полюсами (а) электромагнита и объектом и зазоре $d = 1$ мм (б)

При контактном намагничивании уменьшение межполюсного расстояния от 40 до 25 мм повышает плотность магнитного потока в центре межполюсного пространства от 0,3 до 0,55 Тл (почти двукратное увеличение). При этом тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля в центре межполюсной области объекта (т. е. внутреннее поле) возрастает от 1,6 А/см ($X_0 = 40$ мм) до 2,14 А/см ($X_0 = 25$ мм), т.е. более чем на 30 %.

Как было показано в [1] и как следует из рис. 1, а, уменьшение межполюсного расстояния существенно повышает тангенциальную составляющую индукции в центре межполюсного пространства за счет снижения бокового рассеяния магнитного потока. Очевидно, что при уменьшении межполюсного расстояния ($X_0 \rightarrow 0$) или увеличении ширины полюсов электромагнита ($Y_0 \rightarrow \infty$) боковое рассеяние должно стремиться к нулю. Заметим, что рассмотренные варианты межполюсного расстояния отличаются тем, что в случае $X_0 = 40$ мм межполюсное расстояние существенно превышает ширину $Y_0 = 28$ мм полюсов электромагнита, а во втором случае $X_0 < Y_0$.

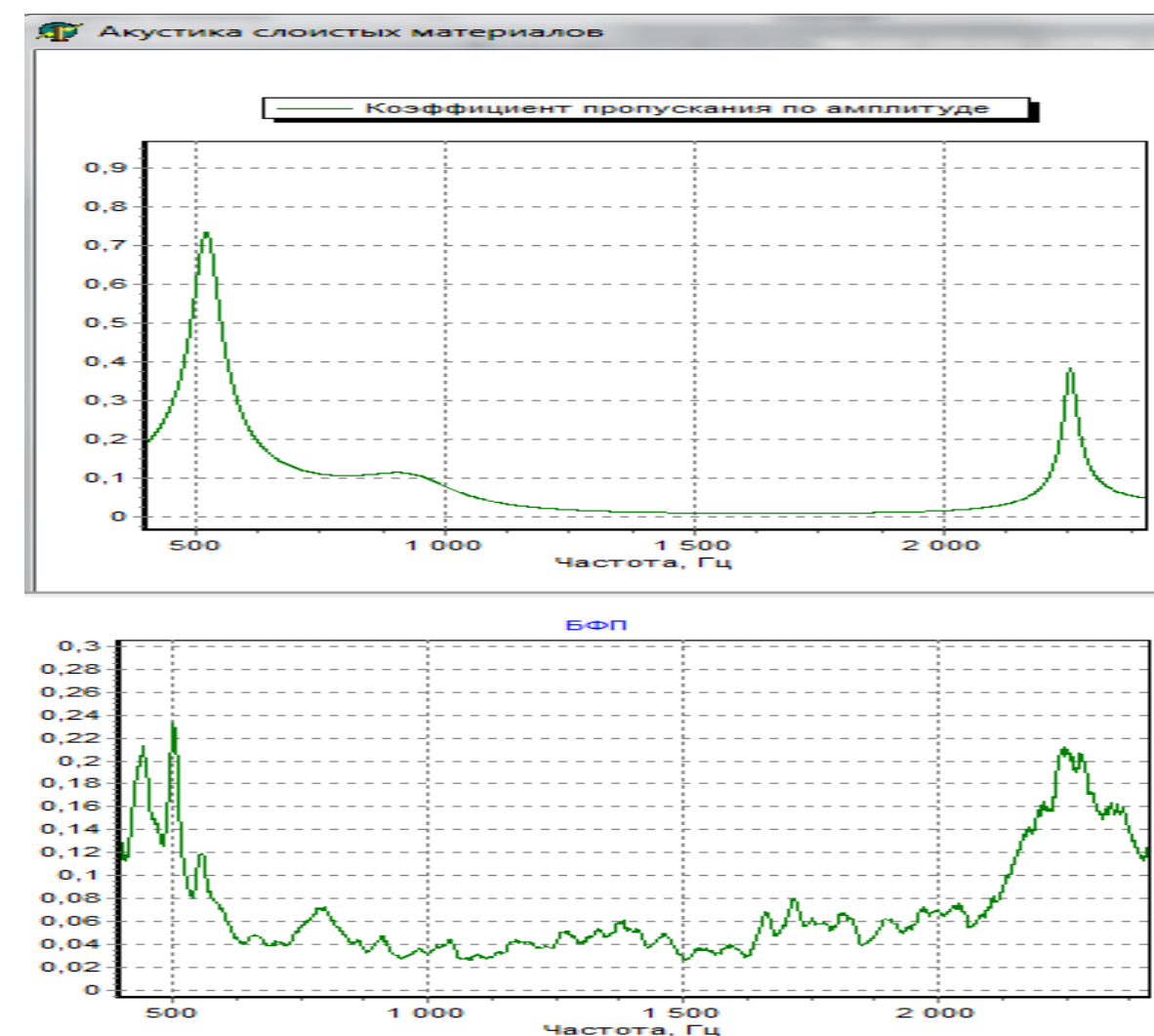


Рис. 2. Расчетный и реальный спектры колебаний на кожухе доменной печи

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акустическая модель футеровки доменной печи для реализации метода собственных колебаний [Электронный ресурс] / Ю. И. Савченко [и др.]. – 2013. – Режим доступа: http://www.rusnauka.com/28_NPM_2013/Tecnic/1_145463.doc.htm.
2. Comparing the Accuracy of Acousto Ultrasonic-Echo (NDT), Finite Element Analysis (FEA), and Drilling When Obtaining a Blast Furnace Refractory Lining Wear Profile. / Sadri Afshin [etc.] // AISTech. – 2009. – Proceedings, Vol. I. – 271 p.
3. **Бреховских, Л. М.** Акустика слоистых сред / Л. М. Бреховских, О. А. Годин. – М. : Наука, 1989 – 416 с.

А. Р. БАЕВ, М. В. АСАДЧАЯ, *О. С. СЕРГЕЕВА, Г. Е. КОНОВАЛОВ
ГНУ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»
*ГУ ВПО «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Минск, Могилев, Беларусь

Значительное число объектов контроля имеют сложный рельеф поверхности – различные технологические выступы, радиусные переходы сопрягаемых поверхностей и пр. (например, валы прессового оборудования, вагонные оси колесных пар, сварные соединения). Нередко такая форма поверхности ограничивает возможности установки преобразователей и создает трудности при введении ультразвуковых колебаний в исследуемую область объекта. В таких случаях возможно использовать преобразователи рэлеевских волн в качестве первичного источника (приемника) поперечных волн, генерация которых происходит вследствие трансформации и рассеяния упругих мод на технологическом выступе.

Несмотря на имеющийся материал теоретических и экспериментальных исследований, вопросы трансформации поверхностных волн (ПАВ) и их рассеяния на выступах различной конфигурации и размеров недостаточно изучены. Данная задача представляет интерес не только для дефектоскопии, но и для других целей в технике ультразвуковых измерений. Так как изучаемые объекты представляют собой волноводы сложной геометрии, знание особенностей прохождения через них различных упругих мод может быть использовано для создания устройств приема и излучения.

В общем случае результирующее поле поперечных волн A_T , возбуждаемых пьезопреобразователем (ПЭП) волн Рэлея в объекте с выступом (рис. 1, а), имеет три составляющие: поперечная волна A_{TE} , трансформированная из волны Рэлея в области сопряжения поверхностей (ОСП) выступа; сопутствующая поперечная волна A_{TS} , возбуждаемая преобразователем одновременно с волной Рэлея; отходящая (боковая) поперечная волна A_{T*} , генерируемая головной волной, трансформированной из волны Рэлея на ОСП выступа.

Как показывают данные экспериментов (рис. 1, б), независимо от рабочей частоты ПЭП при $R_\lambda = R/\lambda_{ПАВ} \approx 0$, где R – радиус ОСП, $\lambda_{ПАВ}$ – длина волны ПАВ, для значений угла выступа $\gamma \leq 90^\circ$ зависимость $A_T(\alpha)$ имеет ярко выраженный минимум, достигающий десятков дБ, в окрестности характерного значения α_{min} . В частотном диапазоне 1–3 МГц положение минимума изменяется не более чем на $4-5^\circ$ (при погрешности угловых измерений не более 1°). При наличии же радиусного перехода выступа ($R_\lambda \approx 3,5$ и более) глубокий локальный минимум поля и сопровождающие его быстро затухающие осцилляции (характерные для случая $R_\lambda \approx 0$) отсутствуют.

В. Н. КОСТИН, О. Н. ВАСИЛЕНКО
ФГБУН ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ УрО РАН»
Екатеринбург, Россия

Магнитные методы определения структурно-фазового и напряженно-деформированного состояния основаны на измерении магнитных параметров контроля (коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, начальная проницаемость и т. д.) и последующей оценке контролируемых параметров (твердость, предел прочности, уровень внутренних напряжений и т. д.) объектов. Наиболее часто применяется локальное измерение магнитных параметров с помощью приставных преобразователей. Локальное полюсное намагничивание приводит к неоднородному распределению поля и магнитного потока в контролируемом объекте. Как было показано в работе [1], пространственное распределение потока преимущественно зависит от формы и размеров электромагнита. Зазор в составной магнитной цепи “преобразователь-объект” оказывает весьма существенное влияние на результаты локального измерения магнитных свойств [2–3]. Зазор также должен менять пространственное распределение поля и магнитного потока внутри объекта контроля изменяя таким образом информативный объем, свойства которого оказывают влияние на результаты измерений магнитных параметров контроля. Однако этот вопрос до настоящего времени не исследовался. Для решения этих вопросов было выполнено с использованием программы ANSYS [4] численное моделирование пространственного распределения магнитной индукции (плотности магнитного потока) при вариации параметров составной цепи “преобразователь-объект”.

На рис. 1 показано пространственное распределение плотности магнитного потока в продольном сечении массивной плиты, намагничиваемой электромагнитом с межполюсным расстоянием 40 мм контактно (рис. 1, а) и при наличии между полюсами и плитой зазора $d = 1$ мм (рис. 1, б). На этом и последующих рисунках второй полюс электромагнита находится слева. Как видно из рис. 1, а, даже без зазора центр межполюсного пространства намагничивается значительно слабее, чем околополюсное и подполюсное пространство ферромагнитного объекта. Появление зазора в 1 мм приводит к тому, что общий магнитный поток в цепи “преобразователь-объект” падает почти в 2 раза. Кроме того, при этом зазоре межполюсное пространство объекта практически не намагничивается, и П-образный электромагнит действует как два отдельных однополюсных электромагнита.

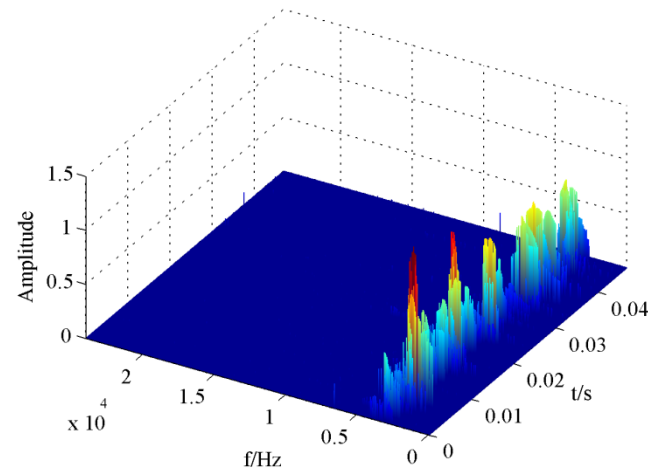


Рис. 1. Трехмерный спектр Гильберта вибрационных сигналов подшипника качения

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что анализ спектра Гильберта сигналов вибрации подшипников качения с использованием метода EEMD и предложенного алгоритма выбора эффективных компонентов IMFs позволяет лучше выявлять локальные детали сигналов и идентифицировать наличие дефектов подшипников качения.

Благодарности

Project supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51305109), the Technology Foundation for Selected Overseas Chinese Scholar, the Hei Long Jiang Postdoctoral Foundation, and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (Grant No. 20122303120010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барков, А. В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев. – СПб. – 2000. – 159 с.
2. The empirical mode decomposition method and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis / N. E. Huang [et al.] // Proc. of the Roy Soc. A: Math., Phys. a. Engineering Sciences. – 1998. – Vol. 454. – P. 903–995.
3. Wu, Z. H. Ensemble empirical mode decomposition: a noise assisted data analysis method / Z. H. Wu, N. E. Huang // AADA. – 2009. – P. 1–41.
4. Peng, Z. K. A comparison study of improved Hilbert-Huang transform and wavelet transform. Application to fault diagnosis for rolling bearing / Z. K. Peng, P. W. Tse, F. L. Chu // MSSP. – 2005. – P. 974–988.

E-mail: kangshouqiang@163.com
falcon@tut.by

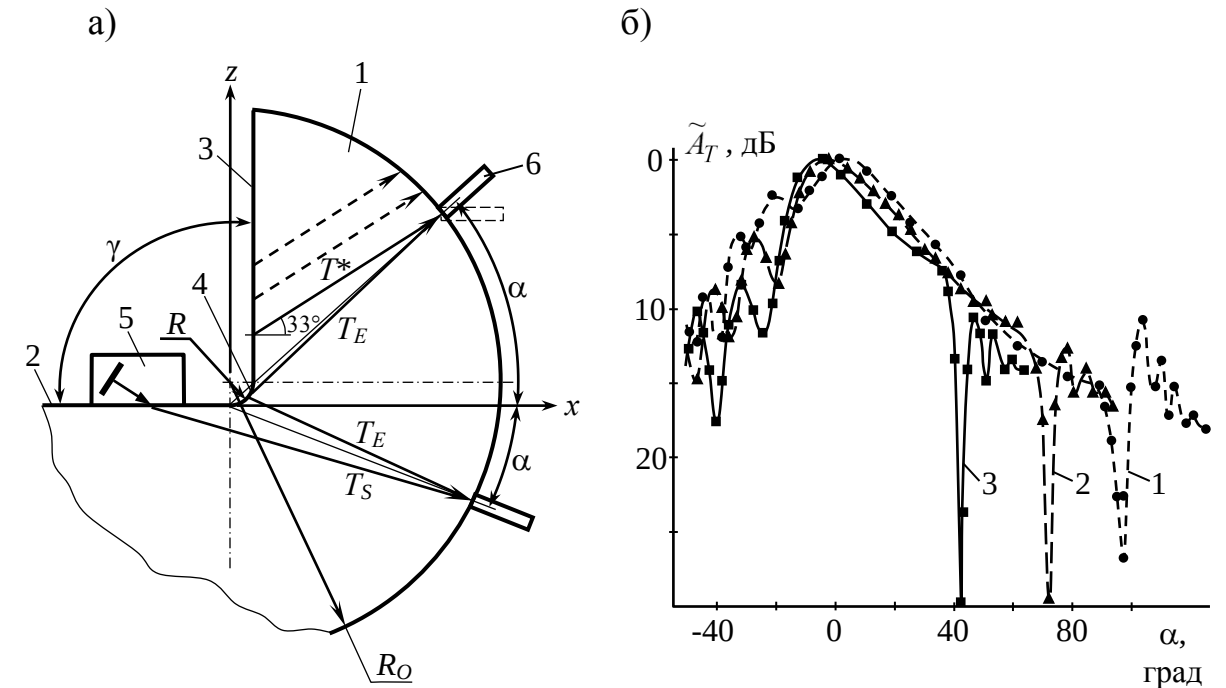


Рис. 1. Пояснение к рассматриваемой задаче (а) и поле поперечных волн в объеме выступа при $R_O \ll 1$ (б): 1 – образец с цилиндрической приемной поверхностью; 2 – контактная поверхность; 3 – внутренняя грань выступа; 4 – ОСП; 5 – излучающий ПЭП; 6 – приемный преобразователь; б) $\gamma=35^\circ$ (1); 60° (2); 90° (3)

Наличие минимума может быть объяснено следующим образом. При трансформации ПАВ на выступе, наряду с рассеянной в области ОСП краевой поперечной модой, возбуждает краевая головная волна (L^*), распространяющаяся вдоль передней грани выступа. Часть энергии этой волны трансформируется в отходящую поперечную T^* -моду [1], которая распространяется под углом $\sim 33^\circ$ к нормали передней грани (рис. 1, а) и приходит в точку приема вместе с T_E -модой. Указанному минимуму амплитуды A_T соответствует фазовый сдвиг между волнами T^* и T_E $\Delta\varphi=\pi$. Предполагая, что один источник (T_E -волна) расположен в окрестности координаты $x=z=0$, а второй (T^* -волна) – на расстоянии s_{L^*} от оси образца на внутренней грани выступа, уравнение для оценки α_{min} имеет вид:

$$t_1 = \frac{R_O}{C_T} = t_2 + \frac{\Delta\varphi f}{2\pi} = \frac{s_{L^*}}{C_L} + \frac{s_{T^*}}{C_T} + \frac{\Delta\varphi f}{2\pi}, \quad (1)$$

где t_1 и t_2 – время прихода T_E и T^* -волн соответственно в точку приема (рис. 1, а); R_O – радиус образца; C_T , C_L – скорости поперечной и продольной волн; f – частота; $s_{L^*}=R_O[\sin\alpha_{min}-(1-\sin^2\alpha_{min})^{0.5}\text{tg}33^\circ]$ – путь, проходимый головной волной вдоль внутренней грани выступа до точки излучения отходящей волны T^* ; $s_{T^*}=(R_O^2+l_1^2-2R_Ol_1\sin\alpha_{min})^{0.5}$ – путь, проходимый далее отходящей поперечной волной T^* в точку ее приема.

По-видимому, подобный эффект имеет место и при формировании поля поперечной волны, возбуждаемой малоапертурным ПЭП со стороны плоской поверхности в полуцилиндрическом образце [2]. При этом, наряду с основной поперечной волной, возбуждается и поперечная отходящая мода, источником которой является сопутствующая головная волна. Результатом взаимодействия этих мод является обнаруженный авторами максимум, а не минимум поля, наблюдаемый в настоящей работе. По-видимому, это различие вызвано особенностями механизма возбуждения мод, обуславливающими другой фазовый сдвиг между ними.

На ход зависимости $A_T(\alpha)$ оказывают влияние ослабление с расстоянием головной волны [1], являющейся источником отходящей моды, размеры образца, частота волны и длительность импульса, а также наклон волнового вектора T^* -моды относительно нормали к поверхности приема. Поле T^* -моды преимущественно зависит от пространственного распределения и силы его источников на поверхности передней грани выступа, определяемых амплитудой и законом ослабления головной волны от длительности импульса, а также частоты волны и геометрии объекта, определяемых безразмерным параметром χ . Экспериментальные исследования зависимости амплитуды головной волны A_L^* от γ показали, что $A_L^*(\gamma)$ достигает максимума при $\gamma=90^\circ$. Установлено также, что головная волна максимальной интенсивности генерируется при радиусе ОСП $R_\lambda \rightarrow 0$, а с ростом R_λ ее амплитуда быстро падает, уменьшаясь более чем на порядок при $R_\lambda \sim 1$.

На основании хода зависимостей $A_T(\alpha)$ в окрестности локального минимума можно оценить вклад в результирующее поле отходящей T^* -моды. Так, например, для $f=1,8$ МГц амплитуда T^* -моды в окрестности α_{min} всего на 8-10 дБ меньше амплитуды максимума исследуемой функции. При значениях γ отличных от 90° , влияние отходящей моды на результирующее поле ослабевает.

Тем не менее, очевидно, что при проведении ультразвукового контроля или измерений (при $\gamma > 90^\circ$) пренебрегать влиянием отходящей поперечной моды недопустимо. В некоторых случаях снижение ее влияния может быть достигнуто путем уменьшения угла выступа или модификации поверхности внутренней грани выступа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолов, И. Н. Исследование ослабления ультразвуковых головных волн с расстоянием / И. Н. Ермолаев, Н. П. Разыграев, В. Г. Щербинский // Дефектоскопия. – 1979. – № 1. – С. 37–40.
2. Акустические поля малоапертурных преобразователей. Поперечные волны, излучаемые прямоугольным источником нормальной силы / А. М. Люткевич [и др.] // Контроль. Диагностика. – 2004. – № 4. – С. 3–8.

где $y_i(t) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K c_{ik}(t)$ – компоненты IMFs, полученные усреднением эмпирических мод $c_i(t)$ по K разложениям исходного сигнала $x(t)$.

После этого выбор наиболее информативных компонент IMFs предлагается осуществлять по максимальному значению коэффициента корреляции $r_{xy}^i(t)$ между каждой усредненной IMFs $y_i(t)$ и исходным сигналом $x(t)$. Коэффициент корреляции вычисляется обычным образом:

$$r_{xy}^i = \frac{\sum_{l=1}^N (x_l - \bar{x})(y_l - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{l=1}^N (x_l - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{l=1}^N (y_l - \bar{y})^2}}, \quad (3)$$

где x_l – выборки исходного сигнала $x(t)$; $y_l(t)$ – выборки соответствующей IMFs; $\bar{x}$ и $\bar{y}$ – их средние значения; N – объем выборок; $i = 1, 2, \dots, n$.

Были исследованы вибрационные сигналы подшипника качения модели 6205 со следующими конструктивными параметрами: число тел качения $z = 9$, их диаметр $d = 7,94$ мм; наружный диаметр $D_1 = 52$ мм, внутренний диаметр $D_2 = 25$ мм. Частота вращения f_r примерно равна 29,95 Гц, частота дискретизации – 12000 Гц.

По формуле $f_0 = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) z$, где $D = \frac{1}{2} (D_1 + D_2)$ была рассчита-

тана частота дефекта внешнего кольца подшипника, численное значение которой составляет 107,3 Гц.

Вибрационный сигнал подшипника был разложен на 10 компонент эмпирических мод. При использовании алгоритма EEMD вычисленные значения коэффициента корреляции для компонент IMFs $y_1(t)$, $y_2(t)$ и $y_3(t)$ были равны 0,6667, 0,9389, 0,3544 соответственно. Эти компоненты и были выбраны для дальнейшего анализа.

На рис. 1 представлен трехмерный спектр Гильберта. Видно, что вблизи составляющей с частотой 3000 Гц наблюдается частотная модуляция, и присутствует спектральная компонента на частоте, примерно равной 108,3 Гц и достаточно близкой к расчетной частоте дефекта внешнего кольца.

КАН ШОУЧЯН, ВАН ЮЙЦЗИН, *А. В. МИКУЛОВИЧ,
*В. И. МИКУЛОВИЧ

«ХАРБИНСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Харбин, Китай; Минск, Беларусь

Подшипники качения являются наиболее распространенным элементом конструкции большинства роторных машин и механизмов и для повышения ресурса и надежности эксплуатируемых машин необходима совершенная система диагностирования их текущего технического состояния [1].

В последнее время для обработки сигналов сложной структуры таких, например, как вибрация машин и их отдельных узлов, все чаще начинает применяться преобразование Гильберта-Хуанга (ННТ), которое представляет собой совокупность эмпирической декомпозиции мод (EMD) и гильбертова спектрального анализа [2]. ННТ в целом представляет собой частотно-временной анализ сигналов и не требует априорного функционального базиса. Функции базиса в этом случае получают адаптивно непосредственно из самих данных процедурами просеивания. После разложения сигнал $x(t)$ можно представить в следующем виде:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r(t), \quad (1)$$

где $c_i(t)$ – существенные модальные функции (intrinsic mode function – IMF), или эмпирические моды; $r(t)$ – остаток, который может быть некоторым трендом или постоянной величиной.

Однако для вибрационных сигналов подшипников качения, как правило, только в некоторых компонентах IMF содержится информация, позволяющая определить изменение их технического состояния. Выбор таких компонентов большей частью является субъективным. В [3, 4] для преодоления этого предложен метод множественной эмпирической декомпозиции мод (ensemble empirical mode decomposition – EEMD), суть которого состоит в многократном добавлении к анализируемому сигналу белого шума с различной дисперсией, разложении на эмпирические моды IMFs и нахождении среднего значения каждой из них. В результате исходный сигнал $x(t)$ будет представлен таким образом:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n y_i(t) + r(t), \quad (2)$$

А. Р. БАЕВ, А. Л. МАЙОРОВ, *О. С. СЕРГЕЕВА, В. В. ПАРАДИНЕЦ

ГНУ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»

*ГУ ВПО «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Минск, Могилев, Беларусь

Методы ультразвукового контроля, основанные на использовании подповерхностных волн, возбуждаемых под первым и вторым критическим углами падения ультразвуковых колебаний (УЗК) на поверхность исследуемого объекта $\beta_{l,t}^*$, находят широкое применение для выявления подповерхностных дефектов, тензометрии, структуроскопии металлоизделий. Поле подповерхностной продольной волны (ПВ) имеет сложную структуру, характеризующуюся тем, что малая часть потока ее энергии локализована в поверхностном слое, а преобладающая – в объеме. Работами сотрудников ЦНИИТМАШ (Москва) и ИПФ НАН Беларуси экспериментально показано, что ослабление амплитуды ПВ с расстоянием x в отсутствие диссипативных процессов и в дальней зоне $\sim x^{-n}$, где $n \approx 1,7-1,8$, если волна распространяется по поверхности объекта, а в объеме – $n = 1$. Причина столь сильного ослабления приповерхностного потока ПВ заключается в наличии стока энергии, уносимой отходящей от контактной поверхности в объект под 3-м критическим углом $\beta_3 \approx 33^\circ$ поперечной модой. Указанные недостатки, а также большое затухание препятствуют применению ПВ для контроля объектов из полимерных материалов, обладающих низкой скоростью звука.

Представляет интерес изучить возможности повышения эффективности контроля таких объектов, управляя структурой поля ПВ за счет изменения граничных условий на поверхности объекта. Прежде всего, обращено внимание на то, что основной сток энергии ПВ в поверхностном слое вызван отходящей поперечной модой, генерируемой лишь при наличии нормальной составляющей смещений u_{z2} . Предполагая $u_{z2} \ll u_{t2}$ (при равенстве тангенциальных напряжений $\sigma_{\tau1} = \sigma_{\tau2}$), следует ожидать изменения диаграммы направленности $\Phi(\alpha)$ источника ПВ и существенного повышения плотности потока акустической энергии в области $\alpha \rightarrow \pi/2$ [1]. Проведен теоретический анализ и рассмотрены особенности распространения ПВ при наличии акустической нагрузки (АН) достаточно большой величины ($\varepsilon = \rho_1 C_1 / \rho_2 C_2 > 1$, где ρ_1 и C_1 – плотность и скорость продольной волны в материале АН, ρ_2 и C_2 – в материале образца) и выполнении граничных условий, преимущественно близких к скользящим ($\sigma_{\tau1} = \sigma_{\tau2} = 0$, $\sigma_{z1} = \sigma_{z2}$, $u_{z1} = u_{z2}$), а также жестким ($\sigma_{\tau1} = \sigma_{\tau2}$, $\sigma_{z1} = \sigma_{z2}$, $u_{z1} = u_{z2}$, $u_{\tau1} = u_{\tau2}$). Теоретический

анализ известных работ и полученных выражений, включая [2], формально показал отсутствие условий для распространения волн типа волн Стоунли (ВС) [3]. В тоже время авторами было предположено именно существование такой волны ввиду того, что упругие параметры одной из граничащих сред (плексиглас-металл) и плотность существенно отличаются по величине от нагружающей среды. Это и позволило предположить “жидкостную” модель для базового звукопровода, граничащего с АН.

На рис. 1 представлена упрощенная схема экспериментальных исследований, позволяющих моделировать как указанные граничные условия (скользящая и жесткая границы), так и плавно изменяющиеся во времени условия. Последнее достигается при отвердевании клеящей композиции, создающей контакт твердых тел. Некоторые данные исследований (рис. 2 и 3) убедительно подтверждают высказанную гипотезу для случая, когда моделируется именно скользящая граница сред и $\epsilon \gg 1$.

При этом установлено, что именно в рассмотренном случае ослабление ПВ в базовом звукопроводе близко к ослаблению, имеющему место в свободном объеме. При этом изменение толщины АН вплоть до длины волны $\lambda_1 \sim 0,3-0,4$ мм практически не сказывается на амплитудных и угловых параметрах поля излучения, что хорошо соотносится с жидкостной моделью Викторова [4]. При этом, как видно, наблюдается существенное перераспределение потока акустической энергии к границе сред. В пользу жидкостной модели служит и тот факт, что расчетное значение уменьшения скорости ΔC под воздействием АН всего на 20 % отличается от полученного в эксперименте. При этом $\partial \Delta C / \partial h > 0$ и плавно изменяется в достаточно большом угловом диапазоне.

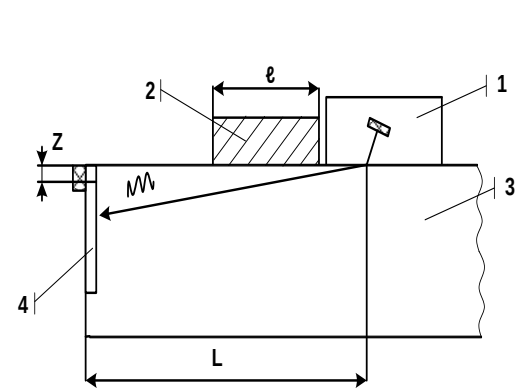


Рис. 1. Схема исследования влияния АН на поле ПВ: 1 – пьезопреобразователь; 2 – акустическая нагрузка; 3 – образец из плексигласа; 4 – магнитная пластина

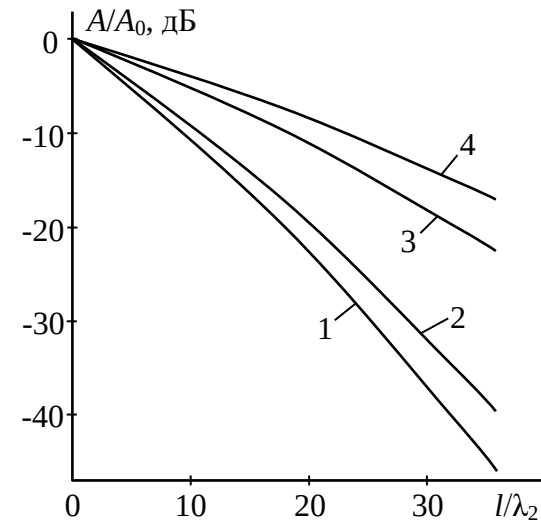


Рис. 2. Влияние акустической нагрузки на ослабление ПВ в плексигласе: 1 – АН отсутствует; 2 – АН плексиглас; 3 – АН сталь толщиной 0,5–30 мм; 4 – ПВ в объеме образца

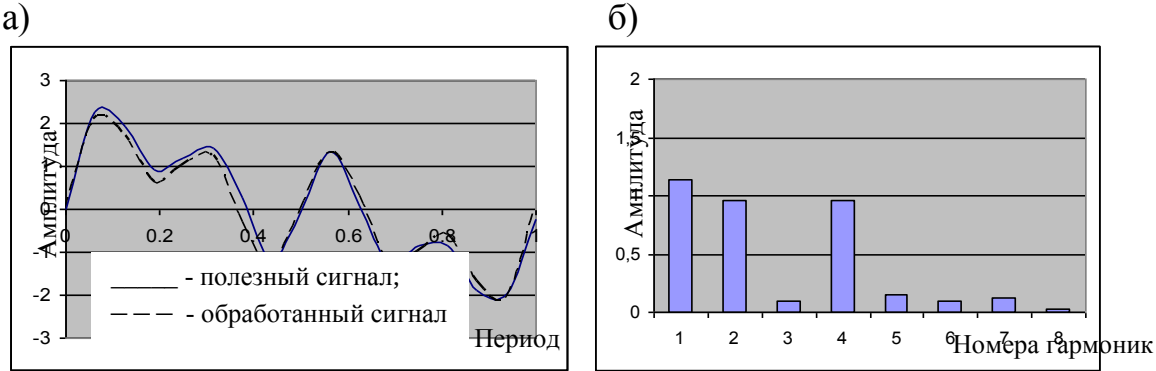


Рис. 2. Результаты моделирования синхронного усреднения: а – сигнал; б – гармонический спектр

Табл. 1. Оценка соотношения сигнал/помеха

СКЗ составляющих их отношение	Количество накопленных реализаций для усреднения				
	5	10	15	20	25
Синхронная	1,225	1,225	1,225	1,225	1,225
Несинхронная	0,596	0,433	0,314	0,253	0,214
Синхрон/Несинхр	2,055	2,827	3,902	4,839	5,723

Применение метода синхронного усреднения при обработке сильно зашумленных сигналов дает хорошие результаты в условиях ограниченной длительности записанного сигнала, значительно улучшая соотношение сигнал/помеха путем отсеивания несинхронных и шумоподобных составляющих. При этом погрешность выделяемых информативных компонент для данного примера не превышает 13 % (т. е. не более $100/\sqrt{k}$, %). Данные свойства указанного алгоритма позволяют эффективно применять его при вибродиагностике механизмов циклического действия, в частности – зубчатых передач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ Р ИСО 13373-2-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 2. Обработка, анализ и представление результатов измерений вибрации. – Изд-во стандартов, 2010. – 25 с.
- Вибрации в технике : справочник в 6 т. / под ред. В. Н. Челомей. – М. : Машиностроение, 1978–1981. – Т. 5. Измерения и испытания / под ред. М. Д. Генкина. – 1981. – 496 с.
- Ширман, А. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А. Ширман, А. Соловьев. – М., 1996. – 276 с.
- James, I. Taylor. The vibration analysis handbook / I. James Taylor. – Vibration Consultants, 1994 – 360 p.
- Чагаев, В. Н. Автоматизированные системы мониторинга технического состояния и работоспособности оборудования / В. Н. Чагаев // Сервисное обслуживание в ЦБП: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конференции. Санкт-Петербург, 19–20 нояб. 2009 г. / под ред. проф. А. Н. Иванова. – СПб., 2009. – С. 36–41.

ляющие с единичной амплитудой (рис. 1, б) и сгенерирована случайная шумоподобная составляющая в диапазоне амплитуд ± 2 (рис. 1, в). Результирующий сигнал приведен на рис. 1, г.

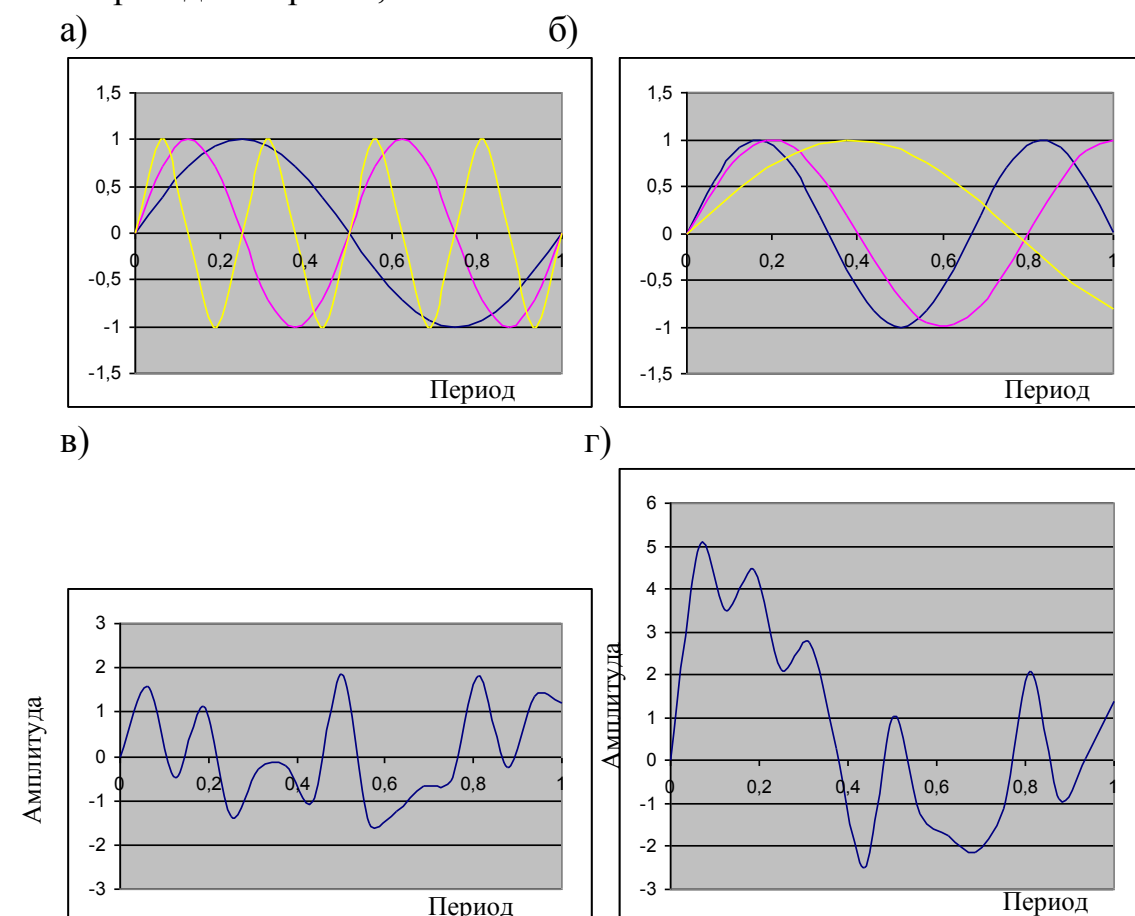


Рис. 1. Моделирование смешанного сигнала: а – синхронные составляющие; б – асинхронные составляющие; в – случайные составляющие; г – суммарный сигнал

Затем результирующий сигнал был обработан с применением метода синхронного накопления. Как видно из рис. 2, а, обработанный методом синхронного усреднения сигнал практически совпадает с исходным полезным сигналом (сумма синхронных составляющих). Амплитуды синхронных гармонических составляющих обработанного сигнала, полученные после применения алгоритма быстрого преобразования Фурье, близки к единичным (рис. 2, б). В тоже время амплитуды несинхронных составляющих сигнала (суммы асинхронных и случайных составляющих) близки к нулю.

Для оценки соотношения сигнал/помеха были вычислены средние квадратические значения (СКЗ) синхронной и несинхронной составляющих при различном числе накопленных реализаций для усреднения (табл. 1). При этом анализ соотношения сигнал/помеха показывает, что в первом приближении его можно принять равным квадратному корню из числа накопленных для усреднения реализаций сигнала.

Установлено, что, варьируя толщину звукопроводной прослойки между образцом и АН, также представляется возможным за счет интерференционных явлений управлять полем излучения ПЭП.

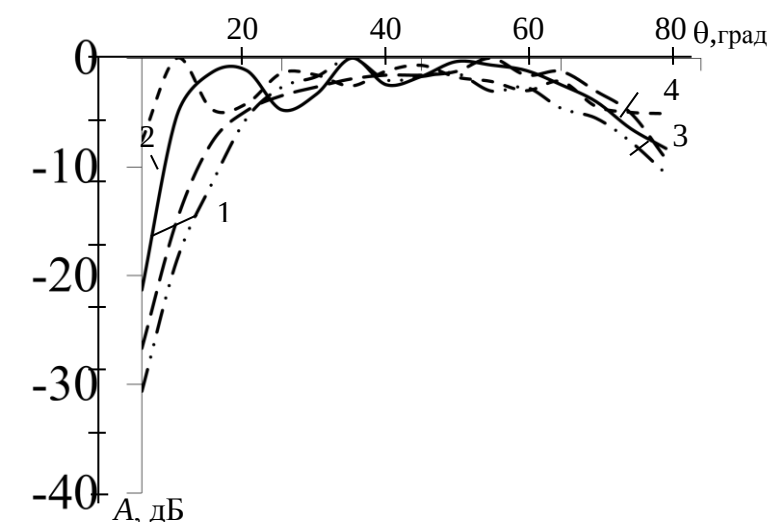


Рис. 3. Влияние длины акустической нагрузки l (мм) на поле излучения ПВ: 1 – 0; 2 – 20; 3 – 50; 4 – 94

Полученные результаты исследований представляют значительный интерес для разработки акустических систем контроля материалов с низкой скоростью звука и удельным акустическим сопротивлением, а также обладающих высоким коэффициентом поглощения. При этом в качестве зондирующих волн предполагается использовать подповерхностные волны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Баев, А. Р.** Особенности возбуждения и распространения продольных и поперечных подповерхностных волн в твердых телах. Ч. 2. Влияние некоторых граничных условий на формирование акустического поля / А. Р. Баев, М. В. Асадчая // Дефектоскопия. – 2005. – № 9. – С. 32–43.
2. **Аббакумов, К. Е.** Распространение акустических волн Стоунли в области границы твердых полупространств при нарушенном акустическом контакте / К. Е. Аббакумов, Р. С. Коновалов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2003. – № 1. – С. 10–16.
3. **Stoneley, R.** Elastic waves at the surface of separation of two solids / R. Stoneley // Proc. Roy. Soc. London A. – 1924. – V.106. – P. 46–429.
4. **Викторов, И. А.** Звуковые поверхностные волны в твердых телах / И. А. Викторов. – М. : Наука, 1981. – 289 с.

УДК 620.179.16
О ВЫЯВЛЕНИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ДВИЖУЩИМСЯ
ЛУЧОМ ИМПУЛЬСНО-ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А. Р. БАЕВ, *В. Г. ГУДЕЛЕВ, *А. И. МИТЬКОВЕЦ, И. В. СТОЙЧЕВА,
Д. А. КОСТЮК
ГНУ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»
*ГНУ «ИНСТИТУТ ФИЗИКИ НАН Беларуси»
Минск, Беларусь

В работе обращено внимание на особенности комбинированного импульсно-лазерного (ИЛ) ультразвукового контроля объектов на предмет выявления поверхностных трещин, пор, инородных включений методом движущегося луча, акустический отклик от которого – поверхностная акустическая волна (ПАВ) принимается пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭП). Существуют два основных направления ИЛ контроля поверхностных дефектов, причем первое из них является традиционным и подобно тому, что реализуется в ультразвуковой дефектоскопии [1]. Так, о наличии дефекта на поверхности, как правило, судят по изменению амплитуды A , отраженной или прошедшей через него волны. При этом зона возбуждения и приема ПАВ ($S_{ПЛЛ}$) находится вне дефекта. Во втором случае о дефекте судят по изменению зондирующего сигнала при пересечении ПЛЛ дефектной области S_D [2]. Так что для тензора напряжений T_{ik} и теплового потока q в области $X \subset S_{ПЛЛ}$ нарушаются граничные условия и следует ожидать значимого изменения амплитудно-частотных характеристик $A(\omega)$ возбуждаемых ПАВ. Для проверки возможностей метода обнаружения поверхностных дефектов проведены экспериментальные исследования, где основное внимание уделено влиянию геометрии и координаты ПЛЛ на амплитуду и форму принимаемого сигнала ПАВ.

Экспериментальная схема исследований поясняется рисунком 1 и содержит источник импульсного лазерного излучения, систему коррекции сечения светового пучка, падающего на исследуемый образец, приемника ПАВ на частоту 2,7 МГц. В качестве объекта исследований использован образец №1 с усталостной трещиной на металле с раскрытием $b \approx 4$ мкм и глубиной $h \approx 0,3-0,4$ мм и № 2 – $b \approx 0,5$ мкм и $h < 0,2$ мм. Некоторые данные исследований приведены на рис. 2 и 3.

Как установлено (рис. 3), зависимость амплитуды зондирующего сигнала $A(x)$ имеет ярко выраженный максимум, достигаемый при расположении центра ПЛЛ, имеющего формы длинной полосы или круга, в окрестности трещины или поры ($x \sim 0$), выходящие на поверхность. Причем максимальное увеличение амплитуды сигнала, характеризуемое амплитудным коэффициентом $\varepsilon_A = A_{max} / A_x$, достигает 7–8 раз, если ширина ПЛЛ d вы-

УДК 620.169.2
ВЫДЕЛЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ
ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА
МЕТОДОМ СИНХРОННОГО УСРЕДНЕНИЯ

Н. Н. ИШИН, А. М. ГОМАН, А. С. СКОРОХОДОВ, М. К. НАТУРЬЕВА
ГНУ «ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ
НАН Беларуси»
Минск, Беларусь

Среди основных вопросов, решаемых в процессе вибродиагностики редукторных систем, немаловажной является задача выделения из общего сигнала составляющих, непосредственно несущих информацию о техническом состоянии зубчатых передач. Вызвано это тем, что вибрации, регистрируемые на корпусе зубчатого привода, содержат информацию обо всех динамических процессах, сопровождающих работу различных элементов машины, и, как правило, некоторую дополнительную шумоподобную составляющую. Одним из методов диагностики, ориентированных на выделение информативных составляющих и позволяющих одновременно улучшать отношение сигнал/помеха, является алгоритм синхронного накопления [1, 2].

Постановка задачи

Суть метода синхронного накопления заключается в суммировании реализаций сигнала на периоде детерминированной составляющей процесса. При этом считается, что амплитуда детерминированной составляющей A растет пропорционально числу слагаемых суммирования k , а ее энергия растет пропорционально k^2 , в то время как дисперсия суммы случайных (непериодических) компонент равна $k\sigma^2$. Отсюда, отношение сигнал/помеха на выходе синхронного накопителя равно $k(A^2/\sigma^2)$, что более чем в k раз превышает то же отношение на входе устройства [2].

Однако при диагностике зубчатых передач часто приходится иметь дело с записями сигналов незначительной длительности ($k=10 \dots 20$). К тому же ряд публикаций приводит другие данные о соотношении сигнал/помеха. Например, есть данные, что отношение на выходе синхронного накопителя в k раз превышает тоже отношение на входе устройства [3]. Или, что скорость стремления помехи к нулю равна квадратному корню из числа реализаций [1, 4]. Некоторые публикации иллюстрируют указанное соотношение в графическом виде, не давая теоретического обоснования [5].

Таким образом, целью данной работы является проверка эффективности метода синхронного усреднения с точки зрения улучшения соотношения сигнал/помеха при незначительном числе накапливаемых реализаций.

Виртуальное моделирование процесса синхронного усреднения

Для моделирования были взяты три синхронные составляющие (на единичном периоде) с единичной амплитудой (рис. 1, а), три асинхронные состав-

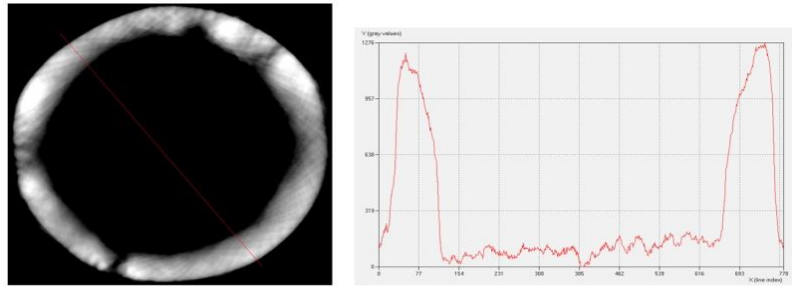


Рис. 2. Поперечное сечение изображения трубы и его профиль вдоль линии, проходящей через центр трубы. Реконструкция методом ТВ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zellner, A. Optimal Information Processing and Bayes Theorem. – Am. Stat. 42 (4) (1998). – P. 278–284.
2. Vengrinovich, V. L. Iteration Methods in Tomography / V. L. Vengrinovich, S. A. Zolotarev. – Belaruskaya Navuka, Minsk, 2009.
3. Multistep 3D X-ray Tomography from a Limited Number of Projections and Views, in Review of Progress in QNDE, Ed. by D.O. Thompson and D.E. Chimenti / V. L. Vengrinovich, J. B. Denkevich, G-R. Tillack, C. Nockeman. – Plenum Press, New York, 1997, Vol. 16, P. 317–323.
4. Vengrinovich, V. L. Limited Projections and Views Bayesian 3D Reconstruction Using Gibbs Priors,” in Proc. 7th ECNDT98 / V. L. Vengrinovich, J. B. Denkevich, G-R. Tillack. – Copenhagen, 1998, p. 2371–2378.
5. W. Von der Linden. Maximum Entropy Data Analysis,” J. Appl. Phys. A 60, 155–165 (1995).
6. Jia, R. Q. A fast algorithm for the total variation model of image denoising / H. Q. Zhao // Adv. Comput. Math. – 33 (2010). – P. 231–241.

E-mail: venq@iaph.bas-net.by
zolotarev@iaph.bas-net.by

брана оптимальной (резонансной) величиной, характеризуемой безразмерным параметром $d^*=d/\lambda_{ПAB}=1,8-2,2$.

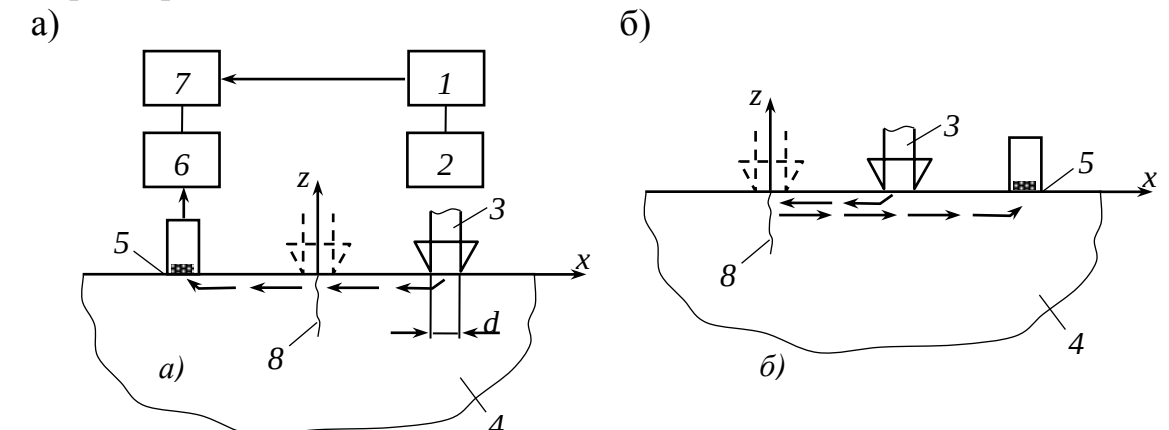


Рис. 1. Схема эксперимента: режим прохождения ПАВ (а) и эхо-режим (б): 1 – лазер; 2 – устройство коррекции луча; 3 – ППЛ; 4 – объект; 5 – приемник ПАВ; 6 – усилитель; 7 – блок обработки; 8 – трещина

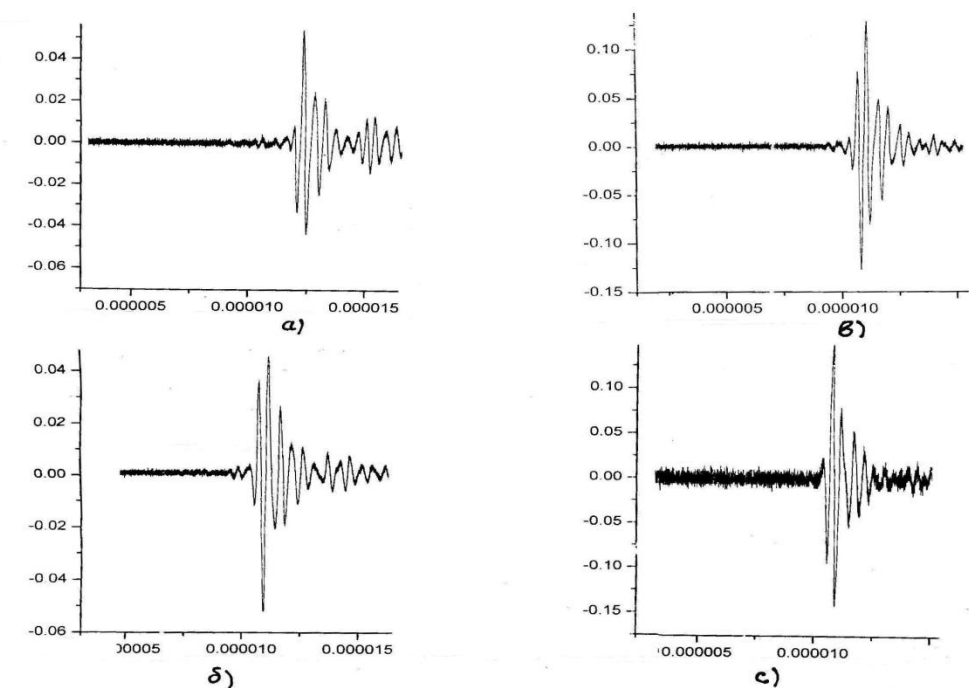


Рис. 2. Сигнал ПАВ при изменении положения ППЛ в форме длинной полосы на образце с трещиной шириной $b \approx 8$ мкм: х, 10^{-3} м = 3 (а); -3 (б); 0,5 (в); -0,5 (г); ось ординат в Вольтах, а ось абсцис в мс

Как видно (см. рис. 2), перемещение ППЛ через трещину сопровождается заметным изменением «вступительной» части импульса, составляющего некоторый временной интервал (два-три его периода осцилляции), что, естественно, сопровождается изменением спектра импульса.

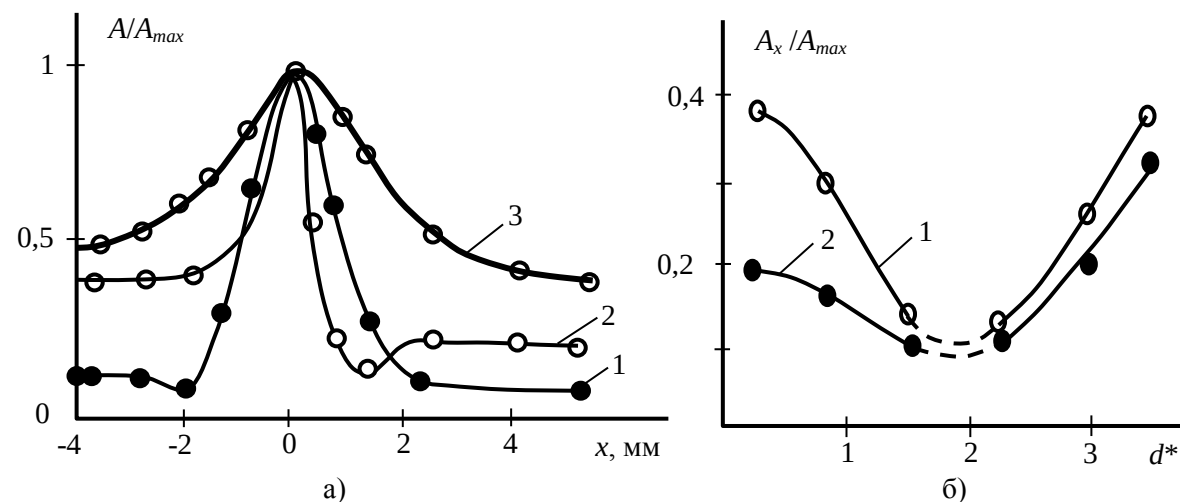


Рис. 3. Амплитуда ПАВ в зависимости от положения ПЛЛ относительно трещины (а) и от безразмерной ширины ПЛЛ d^* (б): (а) – $d^*=2,2$ (1); 0,2 (2); 5 (3); (б) A_x взято при $x=-4$ мм (1) и 4 мм (2)

Кроме того, обнаружено появление “сателлитов” ПАВ, имеющих значительно меньшую амплитуду и, как показано в настоящей работе, вызвано эффектами трансформации ПАВ на трещине в объемную моду и обратно. Амплитудные изменения сигнала на приемном преобразователе при зондировании усталостной трещины с малым (предельным) раскрытием ($\sim 0,5$ мкм) и длиной ~ 3 мм составляли не более 2-х и 3-х дБ. При этом в качестве признака, характеризующего наличие дефекта, может быть использовано именно изменение формы «вступительной» части осцилляции импульса или его спектра. Также установлено, что с помощью рассматриваемого метода представляется возможным выявлять усталостные трещины и на шероховатой и загрязненной поверхности объекта контроля

Результаты настоящих исследований представляют интерес для повышения чувствительности и надежности контроля объектов, расположенных в трудно доступных местах и имеющих сложный рельеф. В частном случае, приемник (приемники) ПАВ может располагаться на движущемся объекте, а возбуждение колебаний производится со стационарной (неподвижной) установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2006. – Т. 3. – 864 с.
2. Laser ultrasonic detection of surface breaking discontinuities: scanning laser source technique / A. K. Kromine [etc.]. // Mater. Evaluation. – 2000. – Vol. 58. – 173 p.

ностным распределением. Таким образом, чтобы рассчитать наиболее вероятное неизвестное решение $\mu(x)$, необходимо максимизировать выражение $P(\mu|p)$, Эта операция максимизации является эквивалентной минимизации следующего функционала:

$$\text{Min: } -\log P(\mu|p) = -\log P(p|\mu) - \alpha \log P(\mu), \quad (4)$$

где шум, может быть представлен следующим образом:

$$\inf\{-\log P(p|\mu)\} = \inf\{\|O_j \mu_{jk} - p_k^m\|^2 : \mu_{jk} \in R^n\}. \quad (5)$$

СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД РЕКОНСТРУКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Статистический метод реконструкции изображений основан на введении априорной информации в процедуру минимизации (4). Этот метод основан на двух общих понятиях, которые исходят из статистик Больцмана и Гиббса. Первая концепция приводит в итоге к методу максимальной энтропии (МЭМ), а вторая концепция ведет к методу максимальной меры Гиббса (МГМ). В методе МЭМ энтропия может быть записана в следующей форме:

$$S(\mu) = -\sum \mu_j \log(\mu_j / M). \quad (6)$$

Тогда вариационная процедура поиска решения приводит к минимизации функционала:

$$J(\mu) = \inf\{\|O_j \mu_{jk} - p_k^m\|^2 + \alpha \sum \mu_j \log \mu_j : \mu_j \in R^n\}. \quad (7)$$

В отличие от предыдущего подхода, в методе МГМ мы приходим к следующей формуле, которая описывает вариационную процедуру

$$J(\mu) = \inf\{\|O_j \mu_{jk} - p_k^m\|^2 + \alpha U(\mu) : \mu_j \in R^n\}. \quad (8)$$

Недостаточная энергия рентгеновского источника вызывает размытие на рентгеновских проекциях вследствие эффектов рассеяния и ужесточения рентгеновских лучей. Рис. 1 показывает поперечное сечение трубы в области сварного шва и изображение трубы.

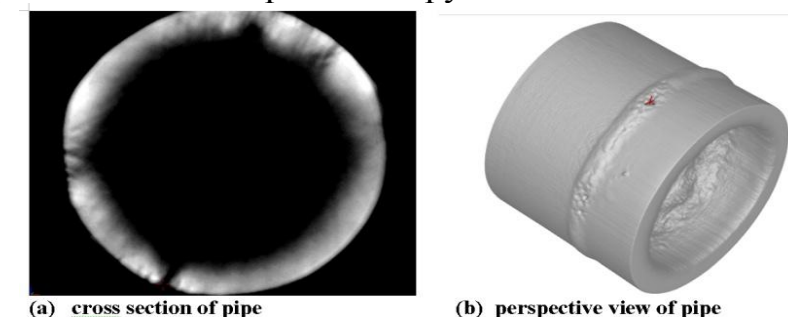


Рис 1. Поперечное сечение и перспективный вид изображения трубы

Применение Байесовского подхода и метода тотальной вариации (ТВ) [6] обеспечило оптимальное качество реконструкции (см. рис. 2).

В. Л. ВЕНГРИНОВИЧ, С. А. ЗОЛОТАРЕВ
ГНУ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»
Минск, Беларусь

ИТЕРАЦИОННАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ФУНКЦИЙ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

Рассмотрим задачу восстановления как обратную некорректную задачу, имеющую целью решение следующего операторного уравнения:

$$p(y) = O\mu(x) + \eta, \quad (1)$$

где p – измеренные данные во временной или пространственной области y , O – оператор, переводящий входные данные в выходные, или один из видов аппаратной функции, заданной в линейном случае с помощью матрицы порядка $m \times n$ с вещественными элементами O_{ij} ; $\mu(x)$ – вектор искомого распределения неизвестных значений и η – шум, наложенный на входные данные. Обобщенное решение (1) или, так называемое, псевдорешение, может быть получено путем решения задачи регуляризации, приводящей в простейшем случае к минимизации квадратичного функционала. Определим псевдорешение из условия:

$$J(\mu) = \inf \left\{ \|\tilde{O}\mu(x) - p(y)\|^2 : \mu(x) \in R^n \right\}, \quad (2)$$

где R^n является n -мерным нормированным пространством с элементами $(\mu_1, \dots, \mu_n)$, а $\tilde{O}\mu(x)$ являются модельными данными, полученными на основании решения прямой задачи [1–5].

БАЙЕСОВСКОЕ ОБРАЩЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Вероятностное правило для оптимальной обработки информации основано на Байесовской теореме для вычисления условной вероятности, которая записывается в виде:

$$P(\mu|p) = \frac{P(p|\mu)P(\mu)}{P(p)}, \quad (3)$$

где $P(\mu|p)$ является апостериорным вероятностным распределением, $P(p|\mu)$ – это вероятностная функция, которая формально описывает отклик измерительной системы с учетом шума, $P(p)$ представляет собой безусловную вероятность экспериментальных данных, которая рассматривается здесь как глобальная нормировочная константа, заданная с помощью правила $P(p) = \sum P(p|\mu)P(\mu)$, и $P(\mu)$ является априорным вероят-

В. И. БОРИСОВ, С. С. СЕРГЕЕВ, А. С. НИКИТИН
ГУ ВПО «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Могилев, Беларусь

Пьезопреобразователи на основе круглых пьезопластин очень широко применяются в акустическом неразрушающем контроле технических изделий и материалов. Характер акустического поля излучения таких преобразователей влияет на информационные возможности и достоверность проводимого контроля. Аналитическое решение для акустического поля круглых пьезопластин во всей области пространства удастся получить лишь для точек, расположенных на акустической оси пьезопластины, также получены удовлетворительные аналитические выражения, описывающие акустическое поле в дальней зоне [1].

В предлагаемой работе приведены результаты численного расчета акустического поля излучения круглых пьезопластин для непрерывного режима возбуждения акустических волн.

Акустическое поле в каждой выбранной точке пространства A с координатами X, Y, Z определяется как результат интерференции всех сферических акустических волн, излучаемых N элементарными излучателями площадью $dS = r dr da$, расположенными в точке с координатами в цилиндрической системе координат $(r, \alpha, 0)$.

Для расчета акустического поля будем использовать численное интегрирование с применением как декартовой, так цилиндрической систем координат. При проведении интегрирования по поверхности пьезопластины заменяем искомый интеграл суммой, которая после разделения временной и пространственных координат дает следующее выражение для величины, пропорциональной амплитуде результирующей волны в точке A :

$$P(X, Y, z) = \sqrt{\left(\sum_0^N \frac{zr}{r^2 + z^2} \cos \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{r^2 + z^2} \right)^2 + \left(\sum_0^N \frac{zr}{r^2 + z^2} \sin \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{r^2 + z^2} \right)^2}. \quad (1)$$

На рис. 1 приведено распределение амплитуды результирующей волны P в относительных единицах вдоль оси пьезопреобразователя на различных расстояниях z от пьезопластины. Расчеты выполнялись для пьезопластины диаметром 10 мм с резонансной частотой 2,5 МГц, нагруженной на воду, работающей в непрерывном режиме, что соответствует длине волны в воде 0,6 мм.

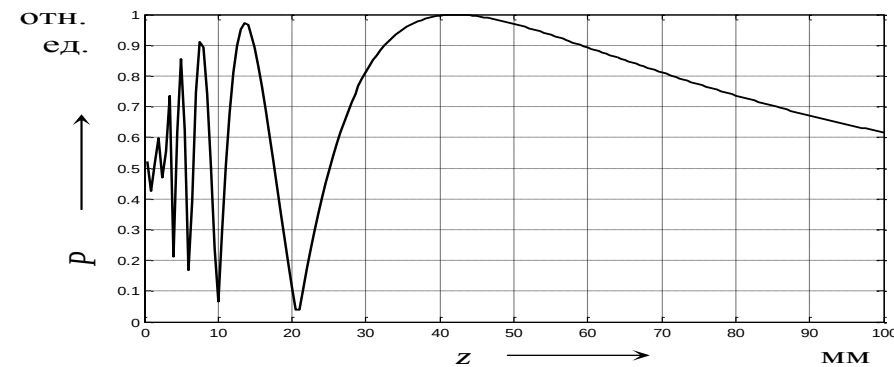


Рис. 1. Распределение амплитуды давления акустической волны на оси круглой пьезопластины диаметром 10 мм

Из рис. 1 видно, что акустическое поле делится на ближнюю (расстояние от пьезопластины от 0 до 42 мм) и дальнюю (расстояние более 42 мм) зоны. Видно, что максимальное давление акустической волны наблюдается на расстоянии 42 мм, что соответствует размеру ближней зоны, определяемому теоретически [1]. На рис. 2 сплошными линиями приведены радиальные зависимости давления в осевых плоскостях пьезопластины на разных расстояниях.

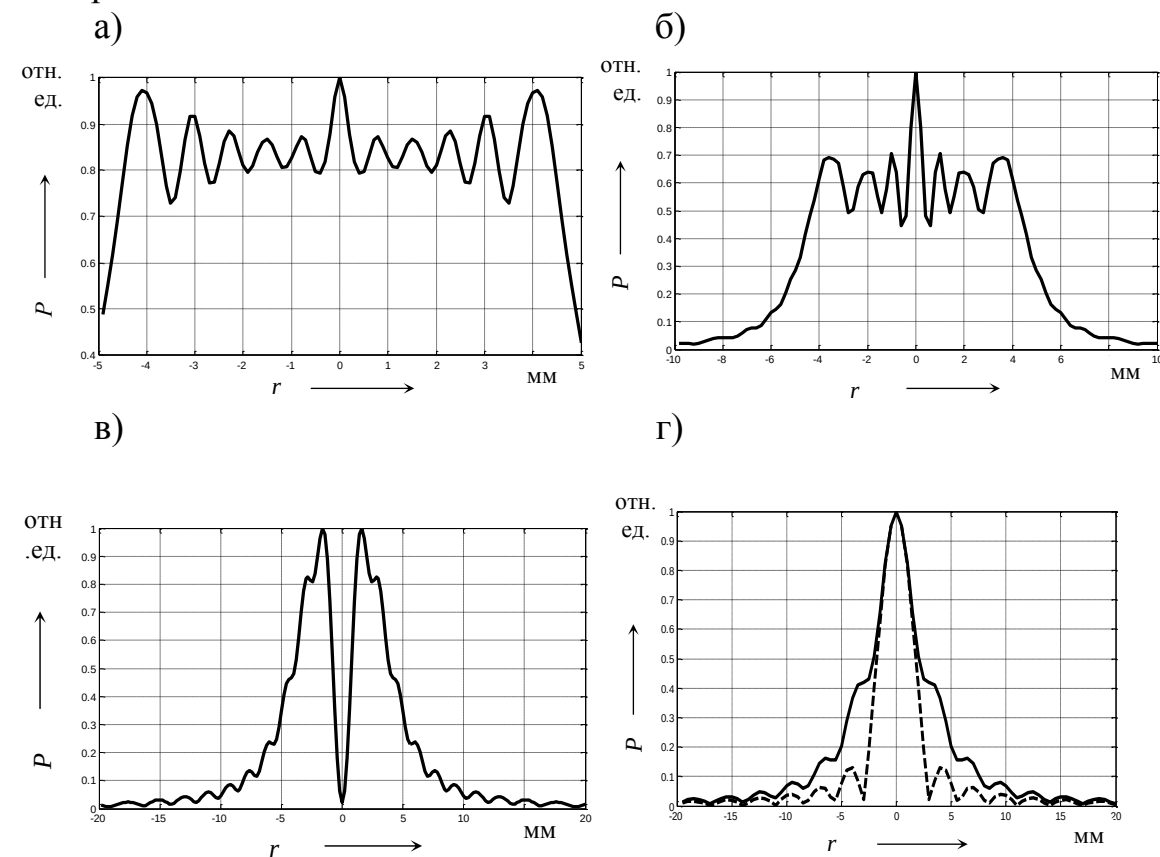


Рис. 2. Радиальные зависимости акустического поля в ближней зоне в осевых плоскостях пьезопластины на разных расстояниях от пьезопластины (а – 2 мм от пьезопластины, б – 5 мм, в – 20,8 мм, г – 42 мм)

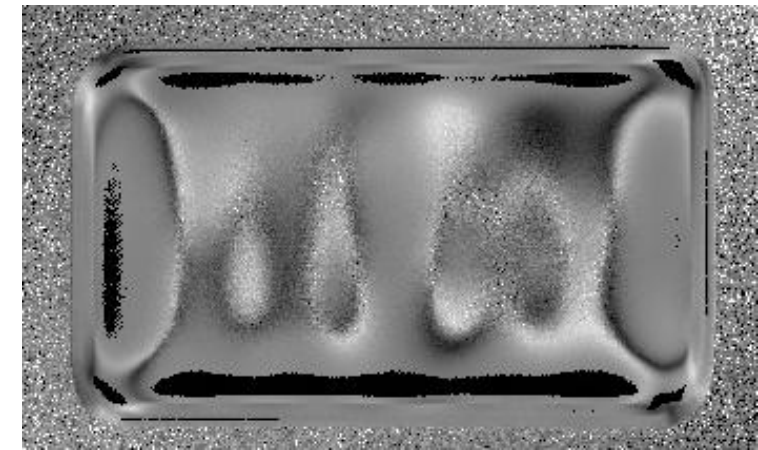


Рис. 3. Распределение значений угла между оптической осью и плоскостью поляризатора $\alpha(x, y)$

После этого рассчитывается распределение напряжений в плоскости протяженного объекта (рис. 4).

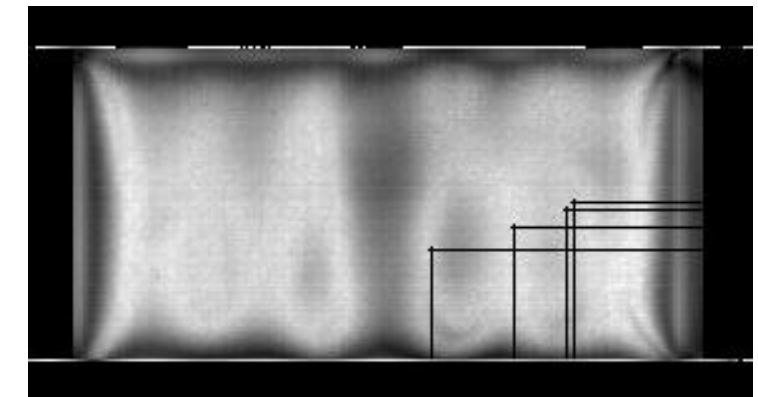


Рис. 4. Распределение механических напряжений в плоскости контролируемого объекта

Таким образом, с помощью программного пакета был реализован описанный выше способ обработки зарегистрированных распределений интенсивности прошедшего через стекло поляризованного излучения, полученных для четырех положений системы «поляризатор – анализатор». В результате обработки получено двумерное распределение разности фаз $\delta(x, y)$, значений угла между оптической осью и плоскостью поляризатора $\alpha(x, y)$, напряжений вдоль осей X и Y и результирующее распределение механических напряжений. Программный пакет позволяет получить массив абсолютных значений напряжений вдоль всей поверхности протяженного объекта.

На заключительном этапе определяется результирующее распределение механических напряжений

$$\bar{\sigma} = \sqrt{(\bar{\sigma}_{xII})^2 + (\bar{\sigma}_{yII})^2}$$

Процесс обработки полученных распределений интенсивности прошедшего через стекло поляризованного излучения по изложенной методике производилось при помощи разработанного специального программного обеспечения (рис. 1).

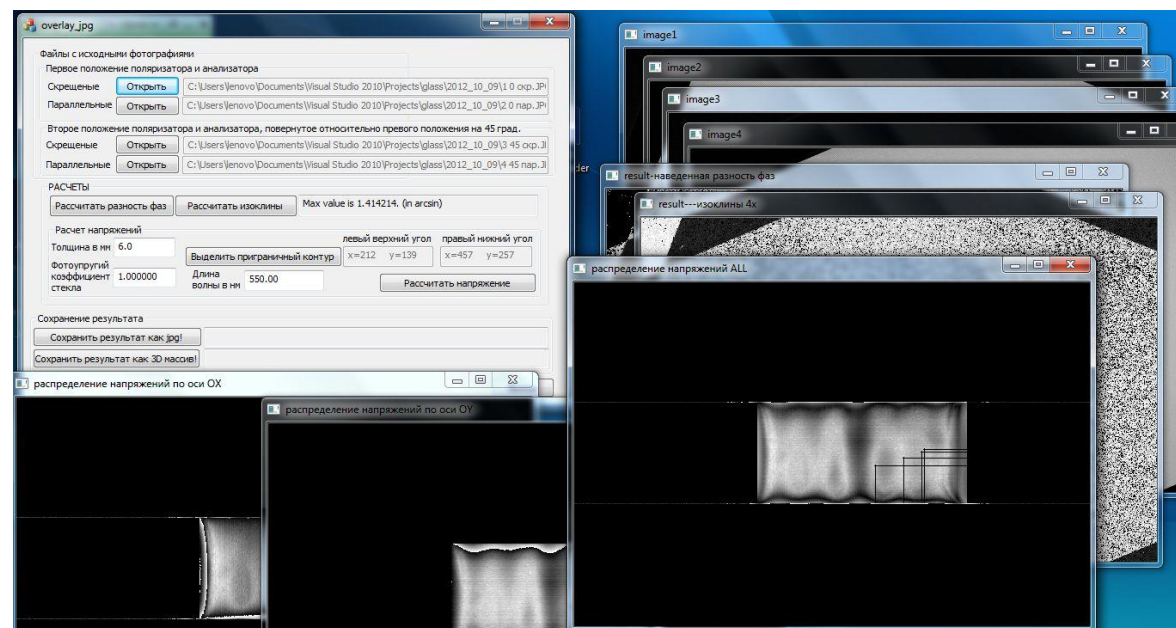


Рис. 1. Интерфейс программы для обработки распределений интенсивности, прошедшего через контролируемый объект, поляризованного излучения

На первом шаге рассчитывается разность фаз $\delta(x, y)$ (рис. 2).

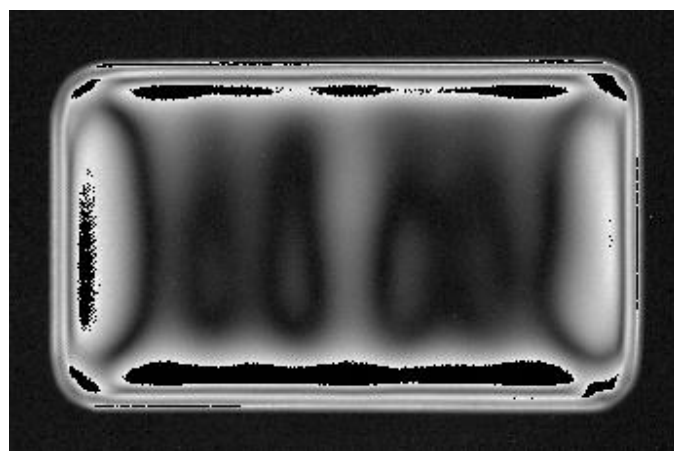


Рис. 2. Распределение разности фаз $\delta(x, y)$

Затем оценивается распределение значений угла между оптической осью и плоскостью поляризатора $\alpha(x, y)$ (рис. 3).

Из рис. 2 видно, что акустическое поле в ближней зоне носит неоднородный характер. Вблизи поверхности пьезопластины максимальное значение давления акустической волны наблюдается возле края пьезопластины, но с увеличением расстояния от пьезопластины на ее оси формируется максимум акустического поля, в который перетекает все больше энергии акустической волны по мере увеличения расстояния от пьезопластины. На рисунке 3 сплошной линией приведено радиальное распределение акустического поля в дальней зоне на расстоянии 100 мм от пьезопластины (рис. 3, а) и общий вид поля на этом же расстоянии (рис. 3, б).

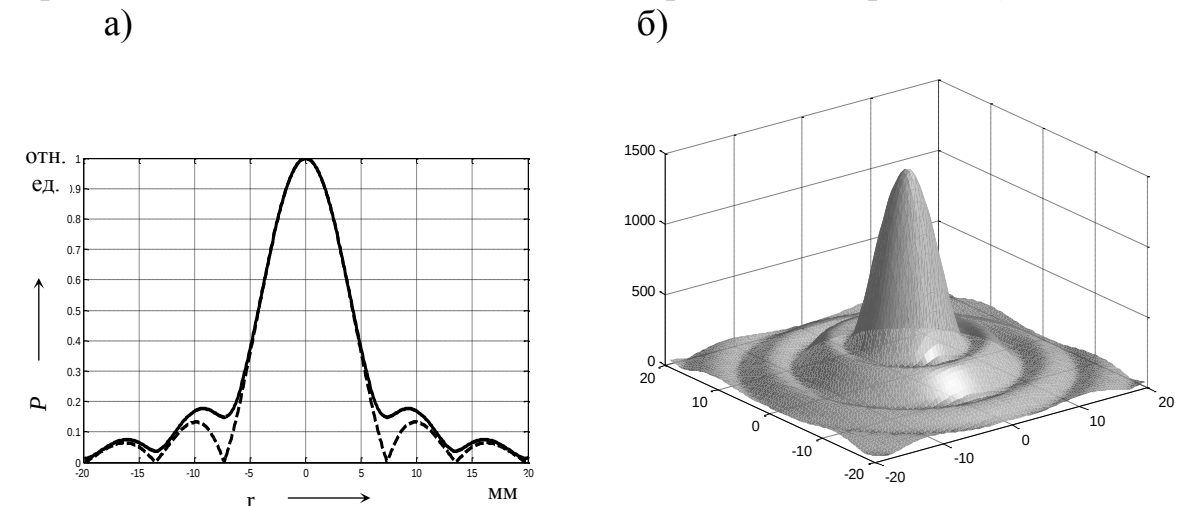


Рис. 3. Распределение акустического поля в дальней зоне на расстоянии 100 мм от пьезопластины

Из рис. 3 видно, что в дальней зоне основная доля энергии акустической волны сосредоточена в околоосевой зоне пьезопластины и по мере удаления все больше энергии перекачивается в основной максимум.

На рис. 2, г и рис. 3, а штриховой линией приведена зависимость радиального распределения амплитуды акустической волны, описываемая известной аналитической зависимостью $\left| \frac{J_1(X)}{X} \right|$, где J_1 – функция Бесселя

первого рода первого порядка, а $X = ak \sin \theta$, где a – радиус пьезопластины, k – волновое число акустической волны в воде, а θ – угол, между перпендикуляром к пьезопластине и направлением на точку, в которой определяется амплитуда волны. Видно, что эта функция хорошо описывает акустическое поле в области центрального максимума.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолаев, И. Н. Неразрушающий контроль: практ. пособие в 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов; под ред. В. В. Сухорукова. – М. : Высш. шк., 1991. – 283 с.

В. И. БОРИСОВ, С. С. СЕРГЕЕВ, Е. Н. ПРОКОПЕНКО,
С. А. ПРОКОПЕНКОГУ ВПО «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Могилев, Беларусь

Пьезопреобразователи на основе фазированных решеток начинают широко применяться в приборах акустического неразрушающего контроля, так как они позволяют перестраивать диаграмму направленности пьезопреобразователя, осуществлять его фокусировку в реальном масштабе времени, что дает возможность реализовать более информативные технологии контроля по сравнению с существующими [1]. Обычно для расчета акустического поля фазированных решеток используется теория дифракции света на оптических дифракционных решетках. При этом выполняются условия, когда период дифракционной решетки превышает длину волны дифрагирующего на решетке излучения и каждая точка волнового фронта в плоскости дифракционной решетки является источником сферической волны, что не в полной мере соответствует излучению акустических волн, так как элементарный излучатель акустических волн является косинусным.

В настоящей работе приводятся результаты прямого расчета акустического поля излучающего пьезопреобразователя в виде линейной фазированной решетки, содержащей 17 прямоугольных элементарных излучателей с периодом $m=1$ мм, размерами $a=0,5$ мм, $L=15$ мм, нагруженных на воду, работающего в непрерывном режиме на резонансной частоте 1,5 МГц, что соответствует длине волны в воде 1 мм. Схема преобразователя приведена на рис. 1.

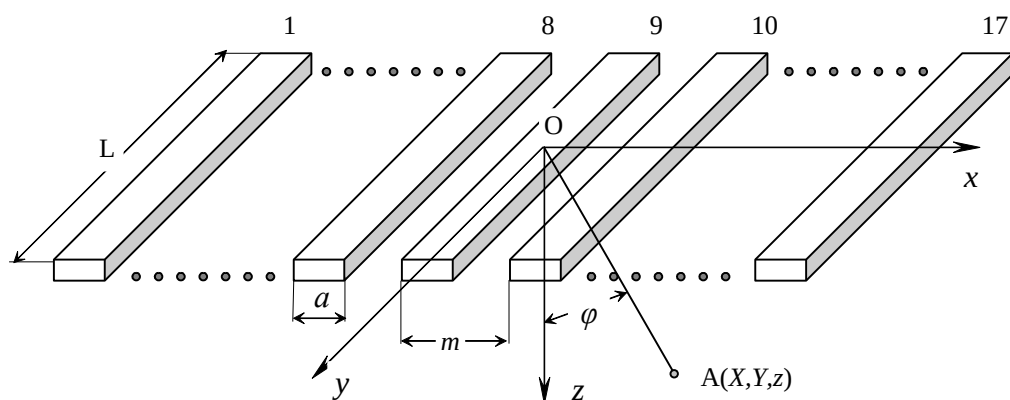


Рис. 1. Схема пьезопреобразователя в виде фазированной решетки

систему «поляризатор – анализатор» ориентируют параллельно относительно друг друга, при этом угол α не изменяется, и осуществляется измерение $I_{\parallel}^{(1)}$. Далее систему «поляризатор – анализатор», ориентируют под углом 90° относительно друг друга и поворачивают на 45° относительно первоначального положения ($\alpha_2 = \alpha + 45^\circ$), а затем измеряют распределение $I_{\perp}^{(2)}$. Поляризатор и анализатор опять ориентируют параллельно относительно друг друга, при этом угол α_2 не изменяется, и осуществляется измерение $I_{\parallel}^{(2)}$.

Полученные распределения интенсивности обрабатываются следующим образом. На первом этапе рассчитывается распределение разности фаз $\delta(x, y)$

$$\delta = 2 \left\{ \arcsin \left(\pm \sqrt{\frac{I_{\perp}^{(1)}}{I_{\perp}^{(1)} + I_{\parallel}^{(1)}} + \frac{I_{\perp}^{(2)}}{I_{\perp}^{(2)} + I_{\parallel}^{(2)}}} \right) + m\pi \right\}, \quad m \in Z.$$

Вычисляется распределение $\alpha(x, y)$

$$\alpha = 0.25 \arcsin \left\{ 2 \sqrt{\frac{I_{\perp}^{(1)} I_{\perp}^{(2)}}{(I_{\perp}^{(1)} + I_{\parallel}^{(1)})(I_{\perp}^{(2)} + I_{\parallel}^{(2)})}} \right\} / \left(\frac{I_{\perp}^{(1)}}{I_{\perp}^{(1)} + I_{\parallel}^{(1)}} + \frac{I_{\perp}^{(2)}}{I_{\perp}^{(2)} + I_{\parallel}^{(2)}} \right).$$

Затем определяются распределения напряжений по контуру:

а) на границах параллельных оси OX

$$\bar{\sigma}_{Xn}(x, y) = 3\delta(x, y) / (kCd), \quad \bar{\sigma}_{Yn}(x, y) = 0;$$

б) на границах параллельных оси OY

$$\bar{\sigma}_{Yn}(x, y) = 3\delta(x, y) / (kCd), \quad \bar{\sigma}_{Xn}(x, y) = 0.$$

Рассчитываются распределения напряжений во внутренних точках.

в) вдоль линии параллельной оси OX

$$(\bar{\sigma}_{Xn})_n = -\frac{1.5}{kCd} \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta(\delta \cdot \sin 2\alpha))_n}{\Delta y} \Delta x,$$

$$\text{где } \frac{(\Delta(\delta \cdot \sin 2\alpha))_n}{\Delta y} = \frac{(\delta \cdot \sin 2\alpha)_{n+1} - (\delta \cdot \sin 2\alpha)_{n-1}}{\Delta y}.$$

$$\bar{\sigma}_{Yn}(x, y) = \bar{\sigma}_{Xn}(x, y) - [1.5 \cdot \delta(x, y) \sin 2\alpha(x, y) / (kCd)].$$

г) вдоль линии параллельной оси OY

$$(\bar{\sigma}_{Yn})_n = -\frac{1.5}{kCd} \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta(\delta \cdot \sin 2\alpha))_n}{\Delta x} \Delta y,$$

$$\text{где } \frac{(\Delta(\delta \cdot \sin 2\alpha))_n}{\Delta x} = \frac{(\delta \cdot \sin 2\alpha)_{n+1} - (\delta \cdot \sin 2\alpha)_{n-1}}{\Delta x};$$

$$\bar{\sigma}_{Xn}(x, y) = \bar{\sigma}_{Yn}(x, y) + [1.5 \cdot \delta(x, y) \sin 2\alpha(x, y) / (kCd)].$$

А. Н. ВАСИЛЕНКО, А. В. ХОМЧЕНКО, В. Г. ГУЗОВСКИЙ
ГУ ВПО «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Могилев, Беларусь

Одной из главных проблем производства закаленных стекол является неравномерное распределение остаточных напряжений в них, возникающих в силу технологических особенностей процесса закалки. В связи с этим представляет определенный интерес визуализация такого распределения. Поляризационно-оптический метод, основанный на регистрации обусловленной напряжениями анизотропии оптических свойств материала, позволяет получить изображение всего поля напряжений в плоскости протяженного объекта.

Поляризационно-оптический метод контроля напряжений.

Величина двулучепреломления, связанная с величиной механических напряжений, может быть измерена оптическим методом при просвечивании объекта поляризованным светом. При этом регистрируемая интенсивность света является функцией двух координат и определяется как:

$$I = I_p T \left(\cos^2 \chi - \sin 2\alpha \cdot \sin(2(\alpha - \chi)) \cdot \sin^2(0.5\delta) \right), \quad (1)$$

где $I = I(x, y)$; $I_p = I_p(x, y)$ – интенсивность света на выходе из поляризатора; $T = T(x, y)$ – коэффициент учитывающий отражение света от поверхностей стекла; $\alpha = \alpha(x, y)$ – угол между оптической осью и плоскостью поляризатора (считаем, что оптическая ось параллельна поверхности стекла); χ – угол между поляризатором и анализатором; $\delta(x, y)$ – разность фаз между обыкновенной и необыкновенной волнами.

Обрабатывая регистрируемые распределения интенсивности $I(x, y)$, можно восстановить разность фаз δ в каждой точке стекла и, учитывая ее взаимосвязь с напряжением, воспроизвести поле напряжений.

Программное обеспечение контроля механических напряжений

Рассмотрим предлагаемую процедуру. Используя цифровое фоторегистрирующее устройство полярископа регистрируется распределение интенсивности прошедшего через стекло поляризованного излучения для четырех положений системы «поляризатор – анализатор». На первом этапе измерение интенсивности осуществляется с использованием системы «поляризатор – анализатор», ориентированных под углом 90° относительно друг друга, при некотором начальном произвольном угле α между оптической осью и плоскостью поляризатора (распределение $I_{\perp}^{(1)}$). Затем си-

Результирующая сила давления в точке A с координатами X, Y, z будет определяться интегралом

$$F(X, Y, z) = \int_S \frac{P_0}{R} \cos \varphi (\cos(\omega t - kR - \psi)) dS, \quad (1)$$

где R – расстояние до точки A от элементарного излучателя площадью $dS = dx dy$, расположенного в точке с координатами x, y , излучающего сферическую акустическую волну частотой ω ; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – модуль волнового вектора (волновое число); λ – длина волны в материале среды, где распространяется акустическая волна; P_0 – амплитуда акустической волны на единичном расстоянии от элементарного излучателя; S – общая площадь всех элементов фазированной решетки; ψ – угол сдвига фаз акустических волн на отдельных элементах фазированной решетки.

Сомножитель $\cos \varphi$ учитывает наклон элементарной площадки к направлению на рассматриваемую точку A .

Расчет интеграла (1) осуществляется путем численного интегрирования, проводя замену интеграла суммой, которая после разделения временной и пространственных координат дает следующее выражение для амплитуды результирующей волны в точке A :

$$P(X, Y, z) = \sqrt{\left(\sum_1^N \frac{z}{R^2} \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} R + \psi \right) \right)^2 + \left(\sum_1^N \frac{z}{R^2} \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} R + \psi \right) \right)^2}. \quad (2)$$

Для получения более высокой достоверности результатов при расчете результирующей амплитуды акустической волны разбиение поверхности элементарных излучателей решетки необходимо проводить на площадки dS такого размера, чтобы разность расстояний от двух соседних площадок до рассматриваемой точки было значительно меньше длины акустической волны. Так по расчетам элементарные площадки были выбраны квадратными с размером стороны 50 мкм, что соответствует вышеуказанным требованиям.

На рис. 2 приведено распределение амплитуды результирующей волны P вдоль оси пьезопреобразователя на различных расстояниях z от плоскости решетки. Расчет проведен для случая равных амплитуд и отсутствия сдвига фаз акустической волны на каждом из прямоугольных элементов решетки.

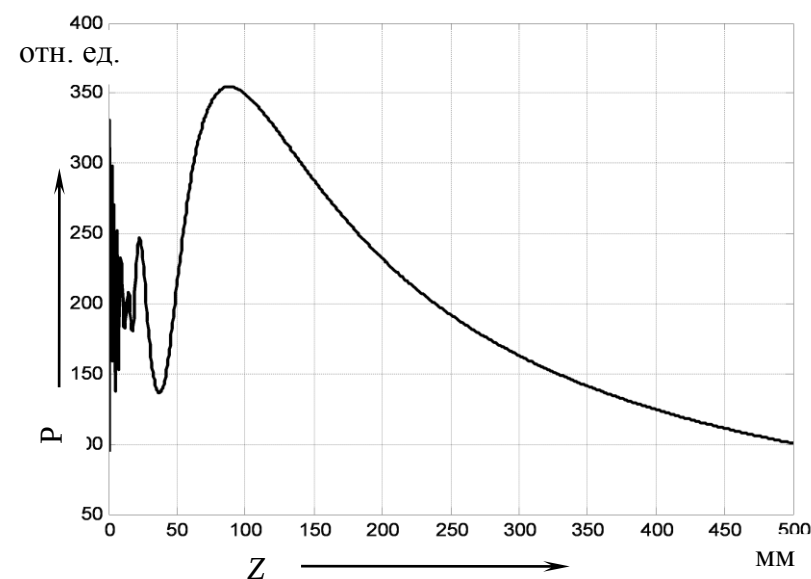


Рис. 2. Зависимость амплитуды результирующей волны вдоль оси пьезопреобразователя на различных расстояниях от решетки

Из рис. 2 видно, что при изменении расстояния от 0 до 86,5 мм наблюдаются осцилляции давления акустической волны, что соответствует ближней зоне пьезопреобразователя, а на расстояниях больше 86,5 мм, наблюдается монотонное уменьшение амплитуды результирующей акустической волны, что соответствует дальней зоне.

Из рис. 2 видно, что последний максимум на расстоянии 86,5 мм является наибольшим, а также последний минимум на расстоянии 37,8 мм самый глубокий минимум. На расстоянии от нуля до 37,8 мм от пьезопластины наблюдаются 7 максимумов и 6 минимумов, где акустическое поле носит резко неоднородный характер.

Характер изменения акустического поля в зависимости от сдвига фаз на соседних элементах фазированной решетки можно проследить на рисунке 3, на котором приведено распределение амплитуды результирующей акустической волны в дальней зоне на расстоянии 200 мм от решетки в осевой плоскости XOZ, перпендикулярной длинной стороне прямоугольных элементов решетки при увеличении величины сдвига фаз на соседних элементах от нуля до 180° .

Из рис. 3 видно, что наибольший максимум акустического поля смещается от оси пьезопреобразователя по мере увеличения сдвига фаз на различных элементах решетки, что соответствует отклонению акустической оси пьезопреобразователя от перпендикуляра к плоскости решетки. Наибольшее отклонение наблюдается при сдвиге фаз 180° , но при этом возникает дополнительный максимум, расположенный симметрично основному относительно оси пьезопреобразователя, как это видно на (рис. 3, д).

висимости для каждого элемента системы между показателями надежности и параметрами моделирования.

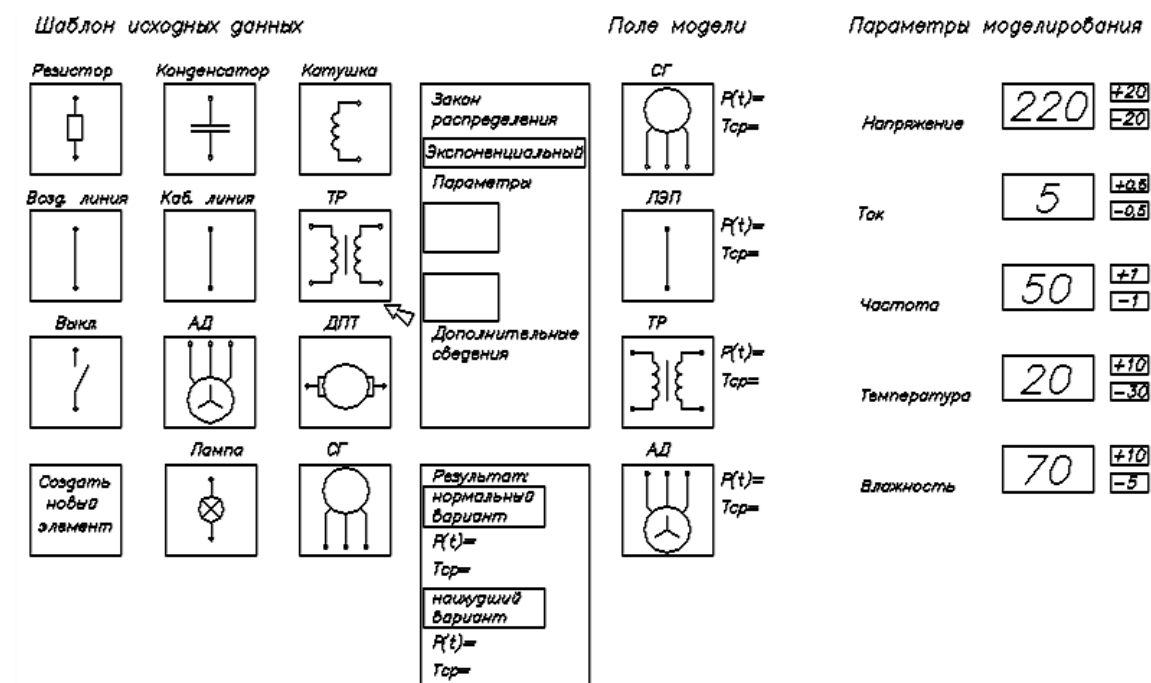


Рис. 1. Часть поля исходных данных математической модели расчета параметров надежности и электропотребления отдельных объектов и сложных технических систем

Практическое применение результатов исследования позволит прогнозировать показатели надежности электрооборудования в зависимости от условий эксплуатации, оценить степень опасности и установить «узкие места» электрических систем, разработать мероприятия по повышению эффективности функционирования электрооборудования.

му. На данном этапе проводились приборные эксперименты по анализу влияния различных показателей электроэнергии на электропотребление для используемого и нового оборудования, рекомендованного при проведении энергоаудита различных предприятий. Современные программные пакеты электрического моделирования позволяют существенно экономить время на расчетах, создавать библиотеки баз данных, программировать отказы элементов, подбирать рабочие прототипы схем, использовать реальные и виртуальные элементы, применять большое число виртуальных приборов, и т. д.

Применение статистического анализа на основе таких программ, как MS Excel, Statgraphics, Statistica, позволяет решить следующие виды задач:

- существует ли связь между отдельными факторами;
- если есть связь, то насколько она тесная;
- какой функцией можно представить данную связь;
- какие входные факторы оказывают на определенные выходные наибольшее влияние;
- какими входные факторы можно пренебречь;
- существуют ли неучтенные факторы.

Все эти задачи можно решить с помощью методов многомерного статистического анализа, включающего в себя следующие анализы: корреляционный, регрессионный, конъюнктный, дисперсионный, факторный, теорию фильтрации.

Этап приборных экспериментов включает подбор соответствующего оборудования и методик испытаний. В перечень средств измерений входят: анализаторы качества электроэнергии, люксметры, тепловизоры и другие приборы.

Библиотека данных по результатам накопленных сведений и проводимых исследований по влиянию различных параметров электрической энергии на электропотребляющее оборудование включает результаты исследований применяемого и нового оборудования.

На основании полученных результатов создана программа математического расчета параметров надежности и электропотребления с учетом условий эксплуатации оборудования с простым, интуитивно понятным интерфейсом. Приложение для смартфонов позволяет непрерывно пополнять библиотеку базы данных в зависимости от результатов опыта эксплуатации нового оборудования.

Структура программного инструментария включает в себя следующие элементы: шаблон исходных данных элементов исследуемого объекта и библиотека реализованных элементов (bibl. elementov); шаблон данных параметров моделирования в виде номинальных величин и отклонений от них (parametr. modelirov); дерево возможных связей между элементами; шаблон влияния различных факторов в виде процедуры аналитической за-

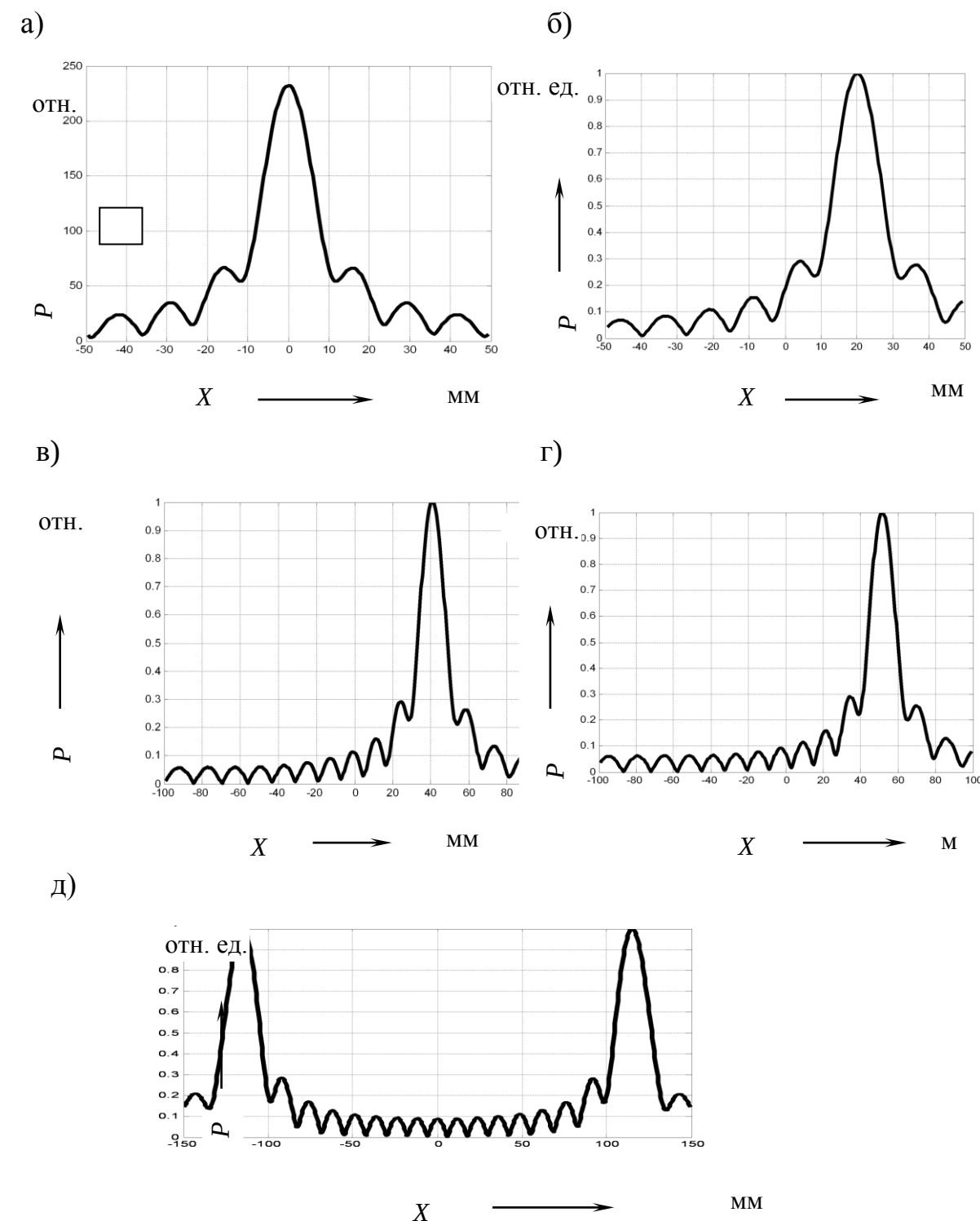


Рис. 3. Распределение амплитуды результирующей акустической волны в осевой плоскости фазированной решетки: а – соответствует нулевому сдвигу фаз; б – 36° ; в – 72° ; г – 90° ; д – 180°

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолаев, И. Н. Неразрушающий контроль: практ. пособие в 5 кн. К. 2. Акустические методы контроля / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов; под ред. В. В. Сухорукова. – М. : Высш. шк., 1991. – 283 с.

ДАТЧИК ДЛЯ КОНТРОЛЯ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБРАЗЦОВ

В. Н. БУСЬКО

ГНУ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»

Минск, Беларусь

Неразрушающий контроль (НК) и диагностика усталостной повреждаемости (УП) ферромагнитных материалов элементов стальных конструкций в процессе эксплуатации, обусловленной циклическим нагружением, относится к приоритетным задачам. Первым этапом решения задачи контроля УП с помощью метода магнитного эффекта Баркгаузена (МЭБ) является проведение мало- и многоцикловых испытаний на образцах-свидетелях. При консольной схеме закрепления образца в результате накопления УП вблизи шейки происходит образование и развитие УТ, которые располагаются поперек образца непосредственно в зоне заземления, и имеют, преимущественно, вытянутую форму. Для повышения чувствительности неразрушающего контроля (НК) образования и развития УТ разработан и изготовлен макет преобразователя Баркгаузена (ПБ) с повышенной чувствительностью к УТ. Датчик конструктивно содержит Г-образный магнитопровод (см. рис. 1), представляющий собой два расположенных относительно друг друга под прямым углом, одинаковых по форме, размеру и длине плеча элемента магнитопровода, являющихся одновременно его полюсами [1]. Один полюс магнитопровода устанавливается на поверхность испытуемого образца, второй – на верхнюю часть узла заземления образца, изготовленного из ферромагнитного материала с высокой магнитной проницаемостью. Образованная таким образом замкнутая магнитная цепь, состоящая из звена «узел заземления – Г-образный магнитопровод – образец», позволяет регистрировать скачки намагниченности в зоне, непосредственно примыкающей в месте заземления образца при использовании консольной схемы создания в нем циклических напряжений. Такая конструкция магнитопровода позволяет расположить измерительную катушку ПБ практически в зоне появления УТ при проведении усталостных испытаний. Второй отличительной особенностью датчика является то, что расположенная между полюсами магнитопровода измерительная катушка (ИК) имеет вытянутую форму с длиной, сопоставимой с длиной полюсов магнитопровода и направлена поперек образца, а плоскость витков катушки относительно образца расположена нормально, в результате чего достигается повышенная чувствительность к УТ [2]. Для обеспечения перемещения в вертикальной плоскости и повышения точности установки ИК в зону измерения, датчик перемещается внутри направляющей, выполненной в виде прямоугольного паза. При работе датчика образец 7 одним концом устанавливают в узел заземления 2 и фиксируют с помощью болтов, на верхней части узла заземления жестко закрепляют направляющую 3, внутри которой перемещается корпус датчика 4, состоящий из двух полюсов магнитопровода 5 и намагничивающей катушки 6,

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ И ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

С. И. БАХУР, В. Н. ГАЛУШКО

УО «ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ

УНИВЕРСИТЕТ им. П.О. Сухого»

УО «БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ТРАНСПОРТА»

Гомель, Беларусь

Для обеспечения безопасной и эффективной работы в режимах эксплуатации и ремонта электрооборудования необходимо знать фактический уровень надежности электрооборудования с учетом воздействия реальных эксплуатационных факторов [1]. Поэтому *актуальной* задачей является разработка методов и математических моделей количественной оценки показателей эксплуатационной надежности и эффективности работы электрооборудования, позволяющих учесть основные влияющие факторы.

Целью данной работы является создание программно-статистического инструментария для уменьшения последствий колебаний параметров электрической сети, повышения надежности электрических объектов и систем. Развитие теории и совершенствование методов расчета показателей эксплуатационной надежности электрооборудования с учетом меняющихся условий эксплуатации и режимов работы.

Этапы математического моделирования включают в себя.

1. Применение программ моделирования электрических объектов и систем.
2. Использование статистического анализа для проверки результатов исследований и прогнозирования изменения параметров.
3. Проведение экспериментов с электрооборудованием.
4. Создание библиотеки данных по результатам исследований.
5. Разработка программного инструментария математического моделирования параметров надежности.
6. Проверка адекватности предлагаемых мероприятий.
7. Составление перечня мероприятий для повышения надежности и эффективности использования электроэнергии.

Целью применения программных пакетов электрического моделирования (Multisim, Simulink) всех элементов систем электроснабжения по отдельности и в комплексе является проверка существующих результатов энергопотребления и прогнозирования изменения электропотребления. По результатам моделирования электрических систем цехов и целых предприятий создана библиотека шаблонов, с помощью которой исследователю не требуется заново создавать рабочий прототип, а лишь составить свою схе-

J_x, J_y, J_z – центральные моменты инерции автомобиля; θ_{ij} – угол поворота j -го управляемого колеса i -й оси.

Для определения боковых реакций опорной поверхности на колеса автомобиля при его криволинейном движении разработаны уравнения кинематических связей, которые состоят из 6 дифференциальных уравнений первого порядка.

Математическая модель учитывает возможность моделирования движения автомобиля практически по любой траектории, которая задается законом поворота его управляемых колес.

Для проведения статистических испытаний разработано программное обеспечение, позволяющее выполнить интегрирование уравнений математической модели курсового движения автомобиля по опорной поверхности со случайным микропрофилем.

Имитационное моделирование проводилось на интервале времени 50 и более секунд с различными значениями массогеометрических параметров по различным траекториям движения. Результаты моделирования выводились в виде численных значений: моментов времени, обобщенных координат, их скоростей, а также боковых реакций опорной поверхности на движители колесной машины.

По результатам моделирования формируются динамические характеристики перечисленных выше параметров. Один из фрагментов имитационного моделирования курсового движения трехосной колесной машины со всеми управляемыми колесами по траектории "переставка" со скоростью 8 м/с представлен на рис. 1.

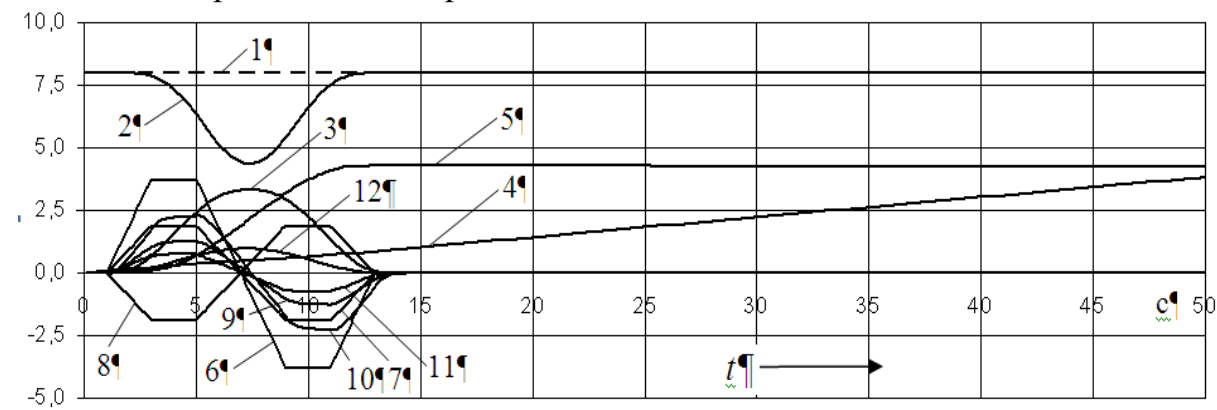


Рис. 1. Фрагмент варианта имитационного моделирования курсового движения трехосного автомобиля со всеми управляемыми колесами по траектории "Переставка": 1 – модуль скорости движения колесной машины, м/с; 2, 3 – скорости перемещения центра масс колесной машины по осям OX и OY , соответственно, м/с; 4, 5 – уменьшенные в 100 и 10 раз перемещения центра масс колесной машины по осям OX и OY , соответственно, м; 6, 7, 8 – увеличенные в 75 раз углы поворота управляемых колес: передних, среднего и заднего мостов, соответственно, рад; 9, 10, 11 – увеличенные в 40 раз углы увода колес: передних, среднего моста и задних, соответственно, рад; 12 – курсовой угол, рад.

расположенной на одном из элементов магнитопровода. Расположенная между полюсами магнитопровода ИК 8 протяженной формы и установленная на упругом элементе 9 предназначена для регистрации МШ и является контролирующим параметром УТ. Полезный сигнал с ИК поступает в электронный блок 10, где происходит измерение и анализ МШ.

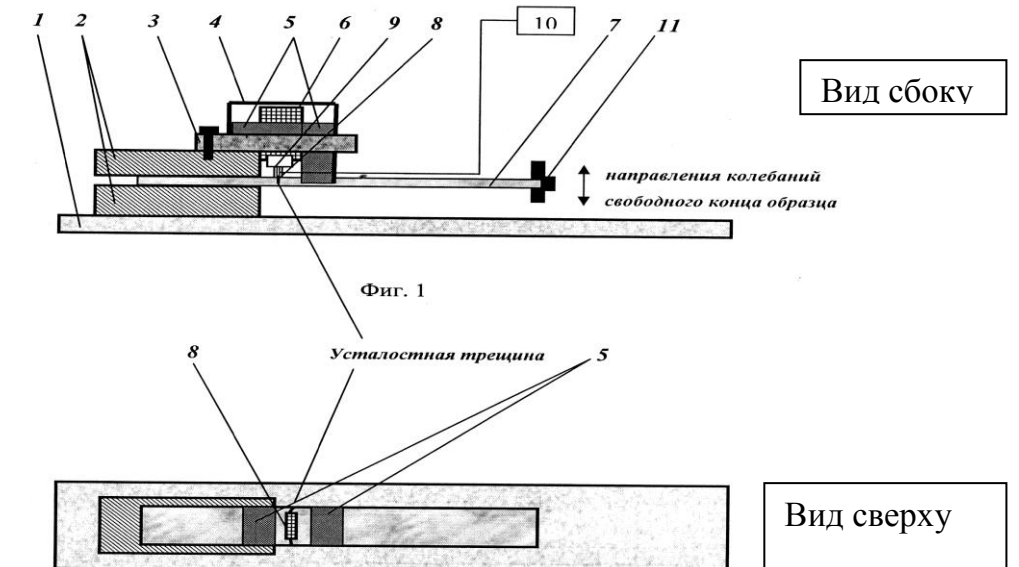


Рис. 1. Датчик для контроля усталостных трещин при изгибных испытаниях образца

Для создания в образце изгибных двухсторонних напряжений, в итоге приводящих к образованию УТ, используется силовозбудитель 11. В результате циклических колебаний образца вблизи зоны заземления, при достижении определенного количества циклов нагружения, возникают микротрещины, вызванные усталостными процессами. За счет образования и развития (растут ширина раскрытия и глубина) УТ изменяются физико-механические характеристики металла контролируемой зоны образца, вызывающие изменение магнитного шума.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 5473 Респ. Беларусь, МПК⁸ G 01 N 27/72. Магнитошумовой преобразователь для контроля усталостных трещин / В. Н. Бусько ; заявитель и патентообладатель ГНУ «ИПФ НАН Беларуси». – № u 20090086 ; заявл. 09.02.09; опубл. 30.08.09 // Афіцыйны бюлетэнь /Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 4. – С. 235.
2. Пат. 9195 Респ. Беларусь, МПК⁸ G 01 N 27/72, G 01 N 27/82. Устройство для контроля усталостных трещин в ферромагнетике при изгибных испытаниях / В. Н. Бусько ; заявитель и патентообладатель ГНУ «ИПФ НАН Беларуси». – № u 20120872; заявл. 08.10.12; опубл. 30.06.13 // Афіцыйны бюлетэнь /Нац. Цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 3. – С. 217.

E-mail: busko@iaph.bas-net.by

УДК 536. 6.081
ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ
ФУТЕРОВКИ ПЕЧЕЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА
В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

П. С. ГРИНЧУК, Н. И. СТЕТЮКЕВИЧ, В. Ф. ШЕВЦОВ
ГНУ «ИНСТИТУТ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА
им А.В. Лыкова НАН Беларуси»
Минск, Беларусь

Печи и другие нагревательные установки состоят из стальной конструкции и внутренней футеровки, выполненной из огнеупоров. В процессе эксплуатации футеровка изнашивается под воздействием термических и механических нагрузок. Футеровка является заменяемым элементом печи и должна периодически обновляться при плановых ремонтах. Стойкость огнеупора не является простой функцией температуры его плавления, обычно сопоставляемой с температурой в печи, а обусловлена течением сложных процессов, зависящих, помимо температуры, еще и от целого ряда взаимосвязанных факторов. Наружный кожух печи, как правило, является незаменимым элементом и от него зависит безопасная эксплуатация печи, его разрушение сильно влияет на процессы дальнейшей деградации теплоизоляции.

Наиболее эффективным способом технического диагностирования такого оборудования является тепловизионный контроль. Тепловизионные системы позволяют проводить, как внешнюю оценку распределения температуры на наружной поверхности печи, ее кожуха, так и внутренний контроль. Основным документом обследования является термограмма поверхности печи с аномалиями температуры. Можно считать, что участки кожуха, имеющие температуру выше 150 °С могут быть отнесены к проблемным зонам. На термоизображениях поверхности печи фиксируются местные участки перегрева, трещины, утонения футеровки печей. Температурные изменения наружной обшивки (кожуха) позволяют оценить степень износа футеровки и необходимость ремонта печи. При анализе результатов тепловизионного контроля также сопоставляются данные текущего и предыдущих измерений, степень неравномерности износа огнеупорной футеровки. Тепловизионный контроль также оказывается весьма эффективным средством для оценки сварных швов кожуха. В случаях, когда сварные швы кожухов выполнены с несквозным проплавлением по толщине обечайки, их тепловое сопротивление будет ниже, чем у основного металла.

В качестве практического примера такого обследования авторами выполнена тепловизионная диагностика нагревательных печей предприятий ОАО «БАТЭ» (г. Борисов), «АВТОГИДРОУСИЛИТЕЛЬ» (г. Борисов).

УДК 621.398
СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ДИАГНОСТИКЕ
КОЛЕСНЫХ МАШИН

Э. И. ЯСЮКОВИЧ
ГУ ВПО «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Могилев, Беларусь

Статистическое моделирование объекта сводится к построению математической модели и алгоритма, имитирующих его поведение с учетом случайных входных воздействий и воздействий внешней среды, и реализации этого алгоритма с использованием программно-технических средств. Результаты моделирования представляются в виде реализации некоторого случайного процесса, статистическая обработка которых позволяет определить характеристики функционирования объекта.

В настоящей работе рассматривается математическая модель вертикальной динамики и курсового движения трехосной колесной машины со всеми управляемыми колесами при движении ее по опорной поверхности со случайным микропрофилем. Математическая модель состоит из динамических уравнений (1) и уравнений кинематических связей.

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_c &= \left[-\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 Y_{ij} \sin(\varphi + \Theta_{1j} - \delta_{1j}) + \sum_{j=1}^2 Y_{3j} \sin(\varphi - \delta_{3j}) \right] / m; \\ \ddot{y}_c &= \left[\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 Y_{ij} \cos(\varphi + \Theta_{1j} - \delta_{1j}) - \sum_{j=1}^2 Y_{3j} \cos(\varphi - \delta_{3j}) \right] / m; \\ \ddot{\varphi} &= \left\{ \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 Y_{ij} [l_1 \cos(\Theta_{1j} - \delta_{1j}) \pm d_{ij} \sin(\Theta_{1j} - \delta_{1j})] - \right. \\ &\quad \left. - \sum_{j=1}^2 Y_{3j} (l_3 \sin \delta_{3j} \pm d_{3j} \sin \delta_{3j}) \right\} / J_z; \\ z_c &= \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 P_{ni} / m; \quad \ddot{z}_i = (P_i - P_{ni}) / m_i, \quad i = 1 \dots 6; \\ \ddot{\psi} &= \sum_{i=1}^3 (-P_{i1} d_{i1} + P_{i2} d_{i2}) / J_x; \quad \ddot{\Phi} = \sum_{i=1}^3 (P_{i1} l_i + P_{i2} l_2) / J_y. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В модели (1) приняты следующие обозначения: x_c, y_c, z_c – обобщенные координаты перемещений центра масс автомобиля по продольной, поперечной и вертикальной осям; $z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6$, – вертикальные перемещения центров колес: левого и правого передней оси, левого и правого средней оси, левого и правого задней оси, соответственно; φ, ψ, Φ – курсовой угол, углы бокового и продольного крена автомобиля; m – поддрессоренная масса автомобиля; m_i – масса i -го колеса; d_{ij} – половина j -ой колеи i -ой оси;

коррозионному растрескиванию увеличивается. Повторные замеры, сделанные после проведенного ремонта, однозначно показывают, что данные области имеют аномально высокие значения коэрцитивной силы в сравнении с металлом остального тела трубы. Известно, что коэрцитивная сила металла увеличивается со временем. Также известна корреляционная зависимость между механическими свойствами стали и коэрцитивной силы.

Трубопровод эксплуатируется в режиме малоциклического нагружения. Для такого режима эксплуатации металла нехарактерны резкие скачки коэрцитивной силы. Значит, кривая изменения коэрцитивной силы с учетом условий нагружения от времени будет верна для всего металла трубы. По этой кривой видно, что точка соответствующая текущему значению коэрцитивной силы в области подверженной стресс-коррозии предполагает меньшее остаточное время безаварийной эксплуатации по сравнению с основным материалом тела трубы. Именно это смещение необходимо учитывать при конечном расчете остаточного ресурса.

Вторая, менее значительная ошибка в расчете надежности заключается в том, что скорость утонения материала рассчитывается по линейному закону, а не возрастающему пропорционально росту коэрцитивной силы.

Следует отметить, что для проведения диагностики с целью оценки остаточного ресурса трубы применяется комплексное обследование вихретоковым, магнитным, магнитопорошковым и ЭМА методами. На точность финальной оценки значительное влияние оказывают результаты измерения, проводимые в ходе диагностики, а значит, требования к используемым средствам НК должны быть соизмеримы с первостепенной важностью поставленной задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ИСО 3183:2007** «Нефтяная и газовая промышленность. Трубы стальные для трубопроводных транспортных систем» (ISO 3183:2007 «Petroleum and natural gas industries - Steel pipes for pipeline transportation systems»).
2. **Шубочкин, А. Е.** Современные тенденции развития вихретоковой дефектоскопии и дефектometрии // А. Е. Шубочкин, А. Г. Ефимов // Контроль. Диагностика. – 2014. – № 3. – С. 68–73.
3. **ОСТ 153-39.4-010-2002** Методика определения остаточного ресурса нефтегазопромысловых трубопроводов и трубопроводов головных сооружений. – Москва, 2002.
4. **Шубочкин, А. Е.** Применение современных средств вихретоковой дефектоскопии для контроля различных промышленных объектов / А. Е. Шубочкин, А. С. Бакунов, А. Г. Ефимов // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 4. – С. 13–16.
5. **Коннов, А. В.** Автоматический электромагнитный (вихретоковый) сканер-дефектоскоп АСД «Вихрь» / А. В. Коннов // Нефтегазовое дело. – 2013 – № 5.
6. **Ремезов, В. Б.** Бесконтактный портативный электромагнитно-акустический толщиномер ЭМАТ-100. Трехмерное представление акустических полей однофазового излучателя // В. Б. Ремезов, А. Ю. Детков, В. Ф. Мужицкий // Дефектоскопия. – 2005. – № 6. – С. 38–46.
7. **Ефимов, А. Г.** Неразрушающий контроль и диагностика трубопроводов / А. Г. Ефимов // Газовая промышленность. – 2011 – № 6. – С. 74.

E-mail: AEShubochkin@mail.ru

Приведем характерные данные обследования для следующих агрегатов предприятий: печь спекания, толкательный агрегат СТЗА 10.45.5/7, термическое оборудование термокузнечного участка инструментального цеха, автоматическая линия "Дегусса" с пульсирующим подом, газонагревательная печь СТОА-16.120 6/10-26-С1, электронагревательная печь СКЗА-8.40.

Печь спекания (инв. №917-019) является проходной печью конвейерного типа и предназначена для спекания деталей, спрессованных из медного порошка. Рабочая температура – 1020° С; установленная электрическая мощность – 180 кВт; производительность – 40 кг/ч. При обследовании печи было обнаружено несколько мест достаточно сильного перегрева наружной обшивки (до 130 °С на боковых поверхностях и до 260° С в месте загрузки деталей, при норме по технике безопасности 45° С). Толкательный агрегат СТЗА 10.45.5/7 предназначен для нагрева под закалку и отпуск мелких стальных деталей в таре (корзины из жароупора). Рабочая температура 860° С; установленная электрическая мощность – 315 кВт (наибольшая установленная мощность из всего эксплуатируемого термического оборудования); производительность – 250 кг/ч. На наружной торцевой поверхности агрегата (защитный кожух, технологическое окно) имеют место локальные перегревы до 250° С. При обследовании термического оборудования термокузнечного участка инструментального цеха был обнаружен характерный для печей данной конструкции дефект – сильный перегрев обшивки в области заслонки 160° С.

Тепловизионное обследование не исключает применение традиционных методов неразрушающего контроля, которые решают свои задачи (толщинометрия), которые плохо решаются тепловым методом. Однако сами условия эксплуатации (высокая температура стенки, невозможность подготовки поверхности контроля, обеспечения доступа изнутри) накладывают ограничения на их применимость. Так, ультразвуковые методы предполагают непосредственный контакт дефектоскопа с поверхностью объекта. Для печи это означает полное охлаждение до нормальной температуры. Применение тепловизионного метода позволяет оптимизировать объемы контроля, выполняемого другими методами и выполнить выборочную проверку толщины на предмет соответствия фактического исполнения проектному.

Дополнительной практической значимостью проведения тепловизионного обследования печей является возможность параллельно решать задачи энергоэффективности эксплуатации диагностируемого оборудования.

E-mail: gps@hmti.ac.by

Н. А. ЖАГОРА, В. В. ФЕДОРОВ
РУП «БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИИ»
Минск, Беларусь

Особенность неразрушающего контроля по сравнению с традиционными видами измерений определяется отличием характера преобразования информации о качестве объекта. В общем случае цепь преобразования этой информации может быть представлена в следующем виде:

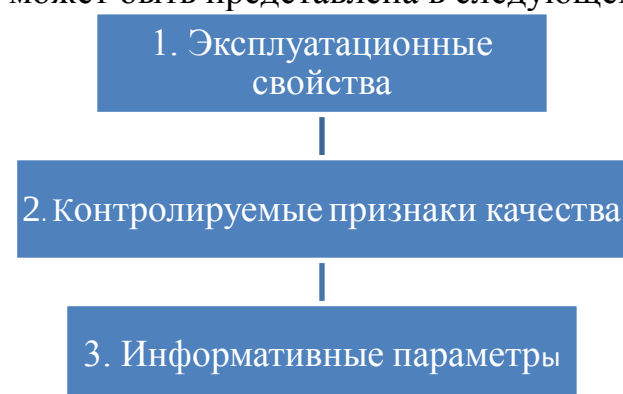


Рис. 1. Преобразование информации при проведении неразрушающего контроля

Для классических видов измерений, как правило, имеет место либо совпадение 1, 2, 3, либо совпадение только 1, 2 и функциональная зависимость между 2, 3 (рис. 1). В последнем случае эта связь определяется физическими закономерностями, изученными и стандартизованными соответствующими уравнениями и неменяющимися существенно при переходе от одного вида объекта измерений к другому. Таким образом, для СИ традиционных видов измерений 1, 2 вообще не учитывается, а 2, 3 – частично. В области неразрушающего контроля, основанном на теоретико-множественной структуре контролируемого признака, 2 и 3 связаны между собой, как правило, корреляционной или иной нефункциональной зависимостью, на которую существенно влияют эксплуатационные свойства объекта контроля (марка и структура материала, геометрия и размеры и др.) широко варьируемые в реальных объектах не только при переходе от одного вида объекта к другому, но и в пределах одного и того же вида, но изготовленного на разных предприятиях. Кроме того, существенное влияние

А. Е. ШУБОЧКИН
ЗАО «НИИИИ МНПО «СПЕКТР»
Москва, Россия

Безаварийная эксплуатация технически опасных объектов невозможна без использования методов неразрушающих контроля (НК). Диагностика на всех этапах эксплуатации изделий металлопроката позволяет не только определить их текущее состояние и оценить уровень износа, но и оценить возможность и сроки дальнейшей эксплуатации.

Трубная промышленность проводит НК практически всей своей продукции [1, 2]. В ходе эксплуатации магистрального трубопровода нет возможности производить периодический контроль всего его объема и выполняется лишь выборочный контроль. Согласно отраслевому стандарту [3] обязательному ВК подлежит не менее 3 %, а толщинометрии 1 % поверхности трубопровода. На практике второй раз труба контролируется, когда расчетный срок ее службы приближается к завершению, тогда перед эксплуатирующей организацией остро встают вопросы принятия решения о возможности ее дальнейшего использования и определения срока остаточного ресурса. На этом этапе качество поверхности, наличие остатков защитных покрытий и грунтовых наслоений делает использование вихретокового, магнитного и ЭМА методов НК более предпочтительными, по сравнению с ультразвуковым контролем для проведения диагностики с целью выявления различных видов несплошностей металла. Для поиска поверхностных дефектов применяется вихретоковый контроль (ВК). С помощью ручных и автоматизированных вихретоковых дефектоскопов [4, 5] выявляются трещиноподобные и стресс-коррозионные дефекты, питтинговая коррозия. ЭМАТ толщинометры позволяют выявить эрозионное утонение стенки, общую коррозию и расслоения [6]. В отношении труб с выявленными дефектами выносится решение об их ремонте либо браковке (полной или частичной). На ремонтпригодных трубах выявленные дефекты должны быть удалены абразивной зачисткой с контролем остаточной толщины стенки трубы.

Дальнейший расчет остаточного ресурса трубы предполагается проводить оценивая запас толщины стенки. В расчете используются значения минимальной остаточной толщины трубы с учетом коррозионно-эрозионного износа и ремонта дефектных участков.

Хотя все допущения прочностного расчета [3] предполагают смещение оценки величины остаточного ресурса в сторону надежности безаварийной эксплуатации, реальное состояние металла трубопровода не учитывается.

Проведенные исследования с использованием магнитного структуроскопа МС-10 производства ЗАО «НИИИИ МНПО «СПЕКТР» [7] показывают, что величина коэрцитивной силы в области подверженной стресс-

лись от заводской смазки в керосине. Линейная скорость вращения подшипника составляла $\approx 0,7$ м/с.

Результаты исследований и их обсуждение. При ступенчатом нагружении вращающихся подшипников установлено, что уровень контактного сопротивления у ПЗ и П4 на порядок выше по сравнению с объектами П1, П2, что указывает на их более высокую технологию производства и качество сборки. Уровень сигнала АЭ у ПЗ самый низкий. При радиальной схеме нагружения подшипника установлено, что ресурс работы ПЗ в 5–6 раз выше по сравнению с П4.

При нанесении дефекта в виде скола внешнего кольца подшипника установлено, на П1–3 уровень контактного сопротивления увеличивается на один-два порядка, что можно объяснить снижением конструкционной прочности внешнего кольца подшипника и увеличением степени свободы тел качения. Уровень сигнала АЭ увеличивается в 5–6 раз. Флуктуация сигнала АЭ и контактного сопротивления увеличивается на один-два порядка и частота их изменения значительно увеличивается.

Было установлено, что чувствительность к изменению состояния поверхности металлов электрорезистивного метода выше, чем метода АЭ. Значительного изменения поведения зависимости момента трения и температуры по сравнению с подшипниками заводской поставки выявлено не было.

Для оценки чувствительности АЭ и электрорезистивного метода, подшипники были заполнены пластичной смазкой LGHB-2. Оказалось, что для всех подшипников уровень контактного сопротивления монотонно увеличивается с течением времени до максимального уровня ($\approx 10^5$ Ом), что обусловлено формированием прочно связанного с поверхностью хемосорбированного смазочного слоя с высокими антифрикционными свойствами, толщина которого составляет $\approx 1,5$ – $2,0$ нм. Уровень сигнала АЭ снижается в 2,0–2,5 раза, а его флуктуации – на порядок, по сравнению с подшипником без смазочного материала. Момент трения снижается незначительно, всего на ≈ 10 %.

Разработан стенд для осуществления входного контроля подшипников качения и оценки состояния их работоспособности в эксплуатационных условиях. Экспериментально установлено, что уровень контактного сопротивления у подшипников производства США и Словакии на порядок выше по сравнению с Российскими подшипниками, что указывает на более высокую технологию производства и качество сборки.

По увеличению чувствительности регистрируемые параметры можно выстроить в ряд: момент трения (грубые конструктивные недоработки при сборке подшипника); сигнал АЭ и его флуктуации (можно судить об отсутствии смазочного материала), уровень контактного сопротивления и его флуктуации (можно судить о состоянии и кинетике изменения толщины граничного смазочного слоя, а также делать заключение о качестве обработки поверхности колец подшипника, её шероховатости, качестве сборки).

Таким образом, комплексный контроль вышеупомянутых параметров позволяет осуществлять входной контроль подшипников качения.

также оказывает, с одной стороны, сравнительно произвольный выбор контролируемых признаков качества для характеристики эксплуатационных свойств объекта контроля и, с другой стороны, определенный круг информативных параметров, ограниченный возможностями известных физических методов неразрушающего контроля.

Указанные особенности определяют необходимость в каждом конкретном случае анализа всей цепи – 1, 2, 3, построения на его основе определенной физической модели СНК и, как правило, двухэтапного подхода к метрологическому обеспечению.

Подобный подход реализован в разрабатываемом БелГИМ межгосударственном стандарте «Контроль неразрушающий. Основные технические характеристики ультразвуковых дефектоскопов и методы их определения», гармонизированным с европейскими стандартами [1–3]. Стандарт будет состоять из трех частей, распространяющихся на электронные блоки ультразвуковых дефектоскопов, ультразвуковые преобразователи, а также на комбинированное оборудование (электронный блок с подключенным преобразователем).

Стандарт устанавливает методы испытаний ультразвуковых дефектоскопов, которые подразделяются на три группы. Первая группа определяет объем и содержание испытаний, проводимых на репрезентативной выборке из партии приборов, что соответствует сложившейся отечественной практике приемо-сдаточных испытаний, а также испытаний с целью утверждения типа. Вторая группа регламентирует периодические испытания каждого экземпляра дефектоскопа через установленные интервалы времени, не превышающие одного года, и, по сути, является перечнем операций поверки ультразвукового дефектоскопа. Эти виды испытаний должны проводиться в аккредитованной лаборатории.

Третья группа испытаний относится к функциональным обязанностям пользователя; в ней представлены виды проверок с целью подтверждения работоспособности дефектоскопа, которые пользователь должен проводить в интервале между поверками ежедневно, еженедельно и т.д., с использованием имеющегося у него эталонного оборудования, в частности, аттестованных аккредитованной лабораторией контрольных образцов с искусственными отражателями (моделями реальных дефектов).

Разрабатываемый стандарт устанавливает синтетический подход к метрологическому обеспечению ультразвуковых дефектоскопов, увязывая в одно целое две сложившихся технических практики – поэлементную и комплектную поверку (верификацию). Подтверждения соответствия отдельно электронного блока и преобразователей, а также технических характеристик системы «электронный блок-преобразователь-кабель-контактная среда-отражатель» предоставляет пользователю более гибкие возможности в комплектации оборудования под решение конкретных задач, возникающих в практике неразрушающего подхода. Этот подход от-

ражает современную тенденцию к глобализации мировой экономики и снятию барьеров в торговых операциях, и, вместе с тем, усиливает ответственность пользователя за результаты проводимого им контроля, возлагая на него часть обязанностей по поддержанию приборов в работоспособном состоянии.

Таким образом, при проведении испытаний первой и второй групп реализуются связи 2, 3 (см. рис. 1), обеспечивается взаимозаменяемость дефектоскопов, позволяющая использовать их в качестве универсальных. Нормирование технических характеристик дефектоскопов при выпуске их из производства носит условный характер и производится с помощью имитаторов, образцовых мер, отражающих определенные их свойства. При испытаниях третьей группы реализуются связи 1, 2 для каждого конкретного случая. Материально-технической реализацией этого этапа являются контрольные образцы, принадлежащие пользователю. При этом универсальный дефектоскоп становится специализированным, но с более высокими метрологическими характеристиками. Таким образом, на первом этапе обеспечивается единообразие ультразвуковых дефектоскопов, затем обеспечивается достаточная достоверность информации о качестве конкретной продукции.

Внедрение нового межгосударственного стандарта на ультразвуковые дефектоскопы позволит обеспечить гармонизацию требований к оборудованию неразрушающего контроля с европейскими требованиями, что служит одним из условий обеспечения конкурентоспособности услуг отечественных лабораторий неразрушающего контроля на мировом рынке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **EN 12668-1:2010.** Non-destructive testing – Characterization and verification of ultrasonic examination equipment – Part 1: Instruments. – CEN, 2010.
2. **EN 12668-2:2010.** Non-destructive testing – Characterization and verification of ultrasonic examination equipment – Part 2: Probes, – CEN, 2010.
3. **EN 12668-3:2013.** Non-destructive testing. – Characterization and verification of ultrasonic examination equipment – Part 1: Combined equipment – CEN, 2013.

УДК 621.891:621.822.6

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ: КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД

О. В. ХОЛОДИЛОВ, *С. В. КОРОТКЕВИЧ, **В. В. КРАВЧЕНКО,
Д. Ю. БЕЛОНОГИЙ

УО «БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТРАНСПОРТА»

*РУП «ГОМЕЛЬЭНЕРГО»

**УО «ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

им. Ф. Скорины»

Гомель, Беларусь

В настоящее время актуальным является вопрос обеспечение входного контроля качества подшипников качения на промышленных предприятиях не только в Республике Беларусь, но и в других странах постсоветского пространства.

Доля брака для торговых марок, ведущих производителей, таких как SKF (Швеция), NSK (Япония), FAG, INA (концерн Schaeffler KG, Германия), SNR (NTN-SNR Group, Франция/Япония) не превышает 2 %. Альтернативу дорогостоящим брендам составляют торговые марки с более приемлемой ценой – KG (KG International FZCO, Индия), ХАРП (ПуАО «ХАРП», Харьков, Украина), UBP (ЗАО «КПК», Курск, Россия) у которых доля брака достигает 80 %. Поэтому для потребителей актуальна проблема оценки состояния подшипников до их установки в объект эксплуатации.

Целью данной является разработка стенда и методики для осуществления входного контроля подшипников качения и оценки состояния их работоспособности в эксплуатационных условиях.

Методика испытаний. Объектом исследования являлись следующие подшипники качения: П1 – АПП 6203RS (группа компаний «АПП», г. Н. Новгород, Россия); П2 – ГПЗ 6-180203 С17 (ООО «ГПЗ», г. Вологда, Россия); П3 – 6202-2RS d16 С3 (Perfect Fit Industries, Inc., США), П4 – ZVL 6302/16 (ZVL, Словакия).

Методами электрорезистивным и акустической эмиссии (АЭ) исследовались подшипники в состоянии заводской поставки и с искусственными дефектами в виде сколов на внешних кольцах.

Подшипники исследовались на разработанном стенде, в котором была реализована упорно-осевая схема нагружения подшипника. Подшипник помещался в металлический цилиндр, внутренняя часть которого сделана в виде конуса. Нагружение подшипника осуществляется сверху посредством конуса, вращающегося с заданной частотой.

Было разработано программное обеспечение для съема и обработки измерительной информации. Контролировались следующие параметры: нагрузка, момент трения, температура, АЭ, контактное сопротивление. Регистрация параметров осуществлялась при ступенчатом нагружении подшипника в диапазоне нагрузок 30–300 Н. Проведена калибровка вышеописанных параметров. Перед проведением испытаний подшипники отмыва-

больше максимальное давление сжимаемого при прокрутке двигателя стартером воздуха (смеси), тем больше сопротивление вращению двигателя, когда данный цилиндр находится в фазе сжатия, и тем больший ток потребляет стартер для проворачивания коленчатого вала. Для цилиндров двигателя с одинаковой компрессией характерна одинаковая амплитуда пульсаций стартерного тока. При снижении компрессии в отдельных цилиндрах наблюдается уменьшение амплитуды пульсаций тока [4]. Повышенная частота вращения коленчатого вала при пониженном потреблении тока стартером указывают на плохую компрессию во всех цилиндрах. Показания частоты вращения менее 150-200 об/мин указывают на возможную низкую степень заряда аккумулятора или неисправность стартера, либо повышенное сопротивление вращению механической части двигателя.

Экспериментальная проверка с применением мотор-тестера «Дельфин-1М» предлагаемого метода, показала возможность использования его для экспресс-диагностики механической части ДВС, что позволило сократить время выполнения процедуры не менее чем в 5 раз при достоверности метода – 0,58...062, которая лежит в пределах известным норм [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бажинов, А. В.** Программно-аппаратный комплекс оценки остаточного ресурса двигателя внутреннего сгорания / А. В. Бажинов, Е. А. Серикова // Вестн. ХНАДУ. – 2009. – № 45. – С. 34–40.
2. **ГОСТ 23435-79.** Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Номенклатура диагностических параметров. – Введ. 1980-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1979. – 8 с.
3. **Кузнецов, А. С.** Техническое обслуживание и диагностика двигателя внутреннего сгорания : учеб. пособие / А. С. Кузнецов. – 4-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2013. – 80 с.
4. **Кузнецов, А. С.** Техническое обслуживание и диагностика двигателя внутреннего сгорания : учеб. пособие / А. С. Кузнецов. – 4-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2013. – 80 с.
5. **Борисенко, А. Н.** Современные информационно-измерительные системы вибродиагностики ДВС / А. Н. Борисенко, П. С. Обод, О. В. Лавриненко // Вестн. НТУ ХПИ. Транспортне машинобудування. – 2010. – № 39. – С. 67–73.

E-mail: kstymaniuk@gmail.com

УДК 620.179

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Д. И. КЛИМОВИЧ, С. С. СЕРГЕЕВ, А. Ю. СКВОРЦОВ
ГУ ВПО «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Могилев, Беларусь

В данной работе исследованы пути и возможности повышения метрологических характеристик ультразвукового контроля на основе применения TOFD-метода для выявления и оценки размеров дефектов при проведении неразрушающего контроля сварных соединений. Проведен анализ эффективности различных схем прозвучивания сварных соединений разных типов для выявления опасных плоскостных дефектов.

TOFD-метод реализуется на основе использования пары специальных ультразвуковых преобразователей (ПЭП), расположенных по разные стороны от дефекта. Пучок ультразвуковых лучей, излученных одним преобразователем, взаимодействует с поверхностью дефекта и принимается другим преобразователем. Волны, получившиеся в результате дифракции на концах дефекта, складываются с обычными отраженными волнами и распространяются от кончиков в виде широких пучков лучей.

Время прохождения регистрируемых сигналов является мерой оценки высоты дефектов, тем самым позволяя измерить дефект. Размер дефектов всегда определяется временем прохождения дифракционных сигналов. При этом амплитуда сигнала не используется в качестве информативного параметра.

Проведены экспериментальные исследования TOFD-метода для оценки возможности обнаружения и определения размеров дефектов в сравнении с традиционным эхо-методом. Объекты исследования – искусственные отражатели в виде пазов и боковых отверстий, имитирующие плоскостные и объемные дефекты, образцы с заложенными отверстиями на разной глубине и разными диаметрами, а также дефекты в реальных образцах сварных соединений.

В данной работе использовались ультразвуковые дефектоскопы УД4-76 и SIUI CTS-703. Контроль TOFD-методом проводился продольными волнами на частоте 5 МГц при угле ввода 70°. Раздвижка преобразователей выбиралась по рекомендации программного обеспечения прибора CTS-703 с помощью «мастера TOFD». По полученным изображениям были рассчитаны глубина залегания и размеры дефектов. Эти же дефекты определялись и измерялись традиционным эхо-методом. Для ультразвукового контроля эхо-методом использовался преобразователь с углом ввода 65° и частотой 2,5 МГц и прямой преобразователь с частотой 2,5 МГц. Ис-

пользовалась схема прозвучивания прямым и однократно отраженным лучом. Оценка высоты дефектов производилась по правилу «-6Дб».

Результаты экспериментальных исследований на образцах с боковыми отверстиями и вертикальным пазом показали, что ошибки измерения высоты дефектов методом волн дифракции значительно меньше, чем при использовании традиционных амплитудных измерений эхо-методом. Среднее отклонение высоты дефектов для метода волн дифракции составило 27 % против 83 % при использовании амплитудного метода «-6дБ». Отклонение глубины залегания дефектов для TOFD-метода составило 3,8 % против 4,23 % для эхо-метода.

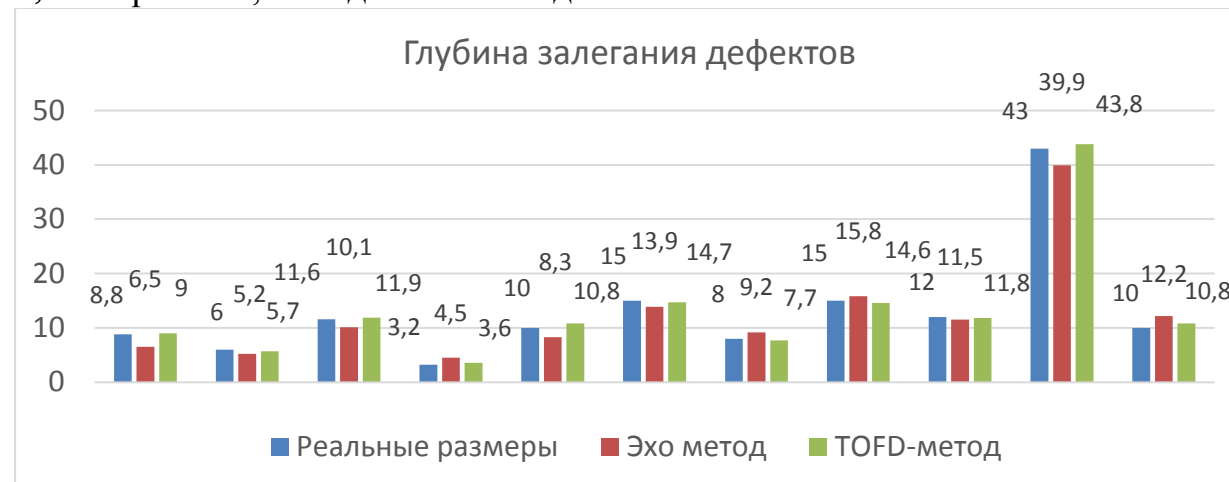


Рис. 1. Измеренные значения глубины залегания округлых дефектов (мм)

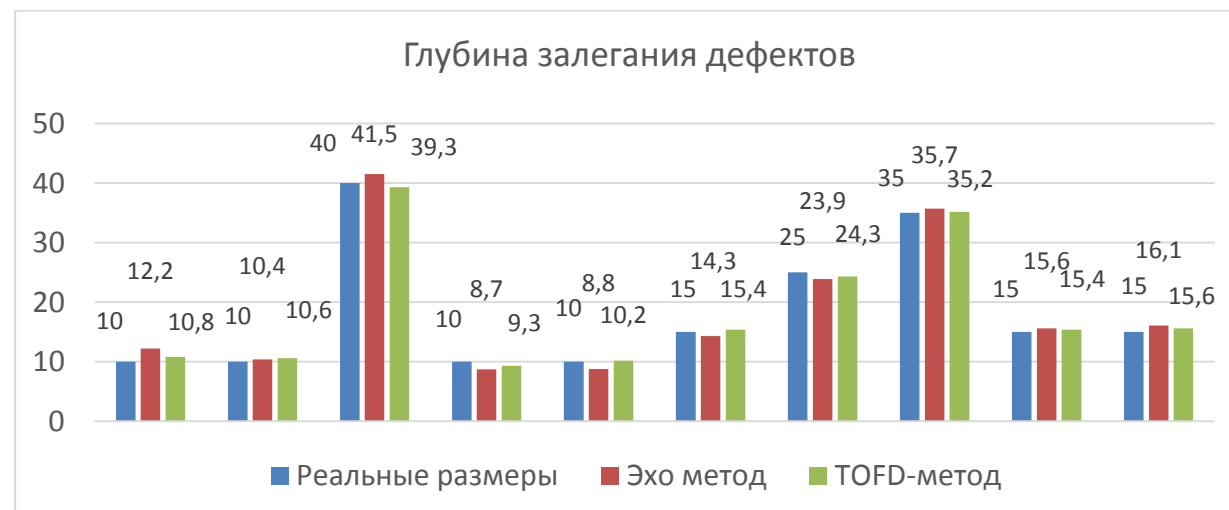


Рис. 2. Измеренные значения глубина залегания плоскостных дефектов (мм)

Анализ погрешностей определения размеров дефектов эхо-методом показывают, что их использование неприемлемо для прочностных методов расчета, кроме того, при контроле на реальных объектах ошибки измерения размеров могут достигать значительно больших величин. Ошибки в измерении размеров дефектов амплитудными методами могут достигать

УДК 006.91 ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ АВТОМОБИЛЬНОГО СРЕДСТВА

К. С. ТЫМАНЮК, В. Л. КОСТЕНКО, Е. Д. ПОПЕРЕКА
«ОДЕССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
Одесса, Украина

Вследствие исключительной разнообразности и сложности объектов диагностика автомобилей пока еще не преобразовалась в строго формализованную систему, где любые проблемы могут быть разрешены при помощи исчерпывающего набора готовых алгоритмов.

Одним из основных агрегатов автомобиля является двигатель, который представляет собой объект, состоящим из нескольких систем, неисправности в которых приводят к взаимному влиянию на функционирование данных систем [1], таким образом возникает сложность в диагностировании двигателя в целом.

Известные методы диагностики механической части двигателя внутреннего сгорания (ДВС), как правило, обладают большой номенклатурой диагностических параметров [2] и, как следствие – имеют сравнительно большое время диагностической процедуры. Недостатком известных методов так же является сложность первичного диагностирования с целью получения информации типа "пригодный"- "непригодный" [3].

Целью исследований является выбор и обоснование метода для экспресс-диагностики и получения первичной информации о состоянии ДВС.

В основу предлагаемого метода положен известный метод определения относительной компрессии по току стартера при прокручивании коленчатого вала двигателя.

На основании исследований ДВС предложено использовать описанный метод (модернизированный) для поставленных целей при оценке элементов механической части двигателя, таких как цилиндропоршневая группа (ЦПГ) и газораспределительный механизм (ГРМ) с последующей сортировкой диагностируемых объектов на "пригодный"- "непригодный".

Метод позволяет провести экспресс-оценку технического состояния бензинового, дизельного двигателя не прибегая к частичной разборке и определить дефектный цилиндр, основываясь на разнице относительной компрессии между цилиндрами. Метод реализуется следующим образом: в процессе прокрутки двигателя стартером коленчатый вал двигателя достигает оборотов примерно до 200-350 мин⁻¹, при этом ток потребления стартера составляет от 80 до 250 А. Данная процедура проводится без запуска двигателя, при этом регистрируется осциллограмма потребляемого стартером тока. Чем герметичнее надпоршневое пространство цилиндра, тем

нии контролируемого параметра, приходится ориентироваться на наихудший случай. Анализ результатов расчетов, приведенных в табл. 1, показывает, что наихудшим видом распределения контролируемого параметра является равновероятное. В случае равновероятного распределения контролируемого параметра риск принять по результатам контроля в действительности годное изделие негодным достигает $R_{изг} = 10,61 \%$ при U-образном распределении неопределенности, $R_{изг} = 8,33 \%$ при равновероятном распределении неопределенности и превышает 5 % для всех исследуемых распределений неопределенности, кроме нормального. При нормальном распределении неопределенности $R_{изг} = 4,65 \%$. Следовательно, для снижения вероятности ошибок контроля, испытательной лаборатории следует применять методику измерительного контроля, обеспечивающую нормальное распределение неопределенности измерений или устанавливать погрешность измерительного контроля меньшую, чем предельно допустимая ($[\Delta] < T/3$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Цитович, Б. В.** Выбор методик выполнения измерений для исследования точности технологических процессов / Б. В. Цитович // Наука и технологии на рубеже XXI века: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Минск : Технопринт. – 2000. – С. 499–504.
2. **Рубичев, Н. А.** Достоверность допускового контроля качества / Н. А. Рубичев, В. Д. Фрумкин. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 172 с.

E-mail: tretzarina@ya.ru

сотни процентов. Точность измерений зависит не только от характера и особенностей несплошности, но и от критериев самой процедуры оценки высоты дефектов.

Анализируя результаты экспериментов, можно сделать вывод о том, что TOFD-метод обеспечивает высокую достоверность выявления и достаточно высокую точность определения размеров внутренних или поверхностных дефектов. Результаты контроля могут быть положены в основу расчетов на прочность и прогнозирования остаточного ресурса объектов. Таким образом, появляется возможность объективно определить риск дальнейшей эксплуатации объекта с дефектами и обоснованно разработать программу ремонтных работ.

На сегодняшний день актуальным вопросом является оптимизация параметров контроля для конкретных объектов и создание универсальных программно-аппаратных комплексов, позволяющих производить широкий спектр контрольных операций для полной диагностики работоспособности исследуемой конструкции. Практическая реализация TOFD-метода не возможна без применения специализированных механических и автоматизированных сканирующих устройств. Сканеры позволяют увеличить производительность за счет скорости получения первичной информации.

Разработаны схема и конструкция специального сканера, который позволяет проводить контроль объектов различной толщины с оптимальными режимами.

Таким образом, использование TOFD-метода в комплекте с разработанным сканером позволяет:

- сократить время простоя оборудования: для проведения контроля достаточно выполнить только продольное сканирование;
- повысить достоверность и информативность контроля, так как выявляются и измеряются трещины практически любой ориентации;
- выявлять и измерять размеры дефектов на труднодоступных участках объектов, что обеспечивается небольшими размерами применяемого сканера;
- принимать обоснованные решения о необходимости замены, ремонта или дальнейшей эксплуатации оборудования, зная тип и фактические размеры (следовательно, и степень опасности) дефектов, выявленных в процессе контроля.

УДК 620.179.14
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОЧНИКА ПЕРЕМЕННОГО
МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ЭТАЛОНА МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

А. А. ЛУХВИЧ, А. П. ГУСЕВ, В. Д. ПИУНОВ
ГНУ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»
Минск, Беларусь

Как сообщалось в [1] по заданию Государственной научно-технической программы «ЭТАЛОНЫ И НАУЧНЫЕ ПРИБОРЫ» на 2011-2015 годы в Институте прикладной физики НАН Беларуси разработан на основе катушек Гельмгольца источник магнитной индукции переменного магнитного поля на диапазоны: по индукции – от $1 \cdot 10^{-7}$ до $2 \cdot 10^{-2}$ Тл, по частоте – от 20 Гц до 1 кГц.

Исходными условиями разработки, кроме указанных диапазонов, являются объем рабочей зоны (сфера радиусом 10 мм) с неоднородностью поля не более 0,3 % и возможность использования ЯМР-измерителя магнитной индукции Ш1-9 для поверки источника. Из последнего условия следуют два дополнительных: неоднородность поля по меньшей мере в сфере диаметром 10 мм не должна превышать 0,02 % и расстояние между обмотками катушек Гельмгольца должно быть не менее поперечного размера датчика прибора Ш1-9.

Особенностью расчета катушек для переменного поля является то, что, кроме учета тепловых потерь, необходима минимизация электромагнитных потерь, которые быстро растут с увеличением силы I и частоты тока возбуждения. Отсюда следует нецелесообразность увеличения размеров рабочей зоны и повышения однородности поля относительно начальных условий. Это значит, что определение размеров катушек должно основываться на точном выполнении начальных условий, а характеристики изготовленных катушек нуждаются в уточнении параметров.

В работе приведены основные характеристики разработанного источника магнитной индукции переменного поля, полученные при экспериментальных исследованиях его параметров. При этом исследовалось распределение индукции магнитного поля в рабочей зоне источника поля, определена постоянная катушек Гельмгольца и ее температурная зависимость, установлены нагрузочные и временные режимы работы.

Степень однородности магнитного поля в рабочей зоне разработанного источника можно охарактеризовать распределением соосной составляющей индукции B_x вдоль оси катушек ОХ и в нормальной к этой оси плоскости (YOZ) симметрии катушек. Распределение соосной составляющей индукции B_x вдоль оси катушек, полученное с помощью экспериментальной установки высокого разрешения, иллюстрируется графиком на рис. 1. Распределение индукции в плоскости YOZ характеризуется зависимостью

Табл. 1. Значения средних рисков изготовителя и потребителя при $P = 0,99$

Распределение неопределенности	Распределение контролируемого параметра					
	равновероятное	нормальное	треугольное	трапециевидное с отношением оснований		
				$\beta = 2/3$	$\beta = 1/2$	$\beta = 1/3$
Риск изготовителя $R_{изг.} \%$						
Нормальное	4,65	0,55	1,45	2,26	1,81	1,62
Треугольное	5,56	0,75	1,75	2,80	2,18	1,92
Трапециевидное $\beta = 1/3$	6,02	0,83	1,92	3,07	2,39	2,11
Трапециевидное $\beta = 1/2$	6,48	0,91	2,01	3,39	2,63	2,31
Трапециевидное $\beta = 2/3$	7,04	1,03	2,95	3,43	2,95	2,59
Равновероятное	8,33	1,36	3,01	4,91	3,80	3,32
U-образное (арксинуса)	10,61	1,97	4,17	9,43	5,31	4,61
Риск потребителя $R_{потр.} \%$						
Нормальное	0,50	0,22	0,37	0,39	0,37	0,37
Треугольное	0,51	0,25	0,37	0,41	0,39	0,20
Трапециевидное $\beta = 1/3$	0,51	0,27	0,41	0,43	0,41	0,21
Трапециевидное $\beta = 1/2$	0,51	0,29	0,42	0,44	0,41	0,21
Трапециевидное $\beta = 2/3$	0,52	0,30	0,43	0,44	0,42	0,22
Равновероятное	0,55	0,33	0,44	0,46	0,44	0,44
U-образное (арксинуса)	0,55	0,37	0,47	0,48	0,46	0,47

Для изготовителя продукции, если определённые из таблиц риски превышают установленный приемлемый уровень, можно предложить следующие мероприятия, базирующиеся на предварительном проведении экспериментальных исследований: выбрать другое технологическое оборудование и, тем самым, изменить параметры технологического процесса; установить погрешность измерительного контроля меньшую, чем предельно допустимая ($[\Delta] < T/3$), соответствующую приемлемым уровням рисков, и обеспечить ее соблюдение, для чего разработать более точную методику измерений, при невозможности применить более точную методику измерительного контроля выбрать методику с более удачной аппроксимацией распределения неопределенности.

При проведении контроля продукции в независимых аккредитованных испытательных лабораториях на контроль поступает малая выборка образцов и неизвестна априорная информация о технологическом рассея-

где $[\Delta]$ – пренебрежимо малая неопределенность измерений, которую принимают за предел допустимой погрешности измерений; T – допуск параметра, равный разности между двумя его нормированными предельными значениями $T = USL - LSL$.

Формулы для расчета средних рисков изготовителя и потребителя предложены Рубичевым и Фрумкиным [2]:

$$R_{\text{потр}} = 1 - \frac{\int_{LSL}^{USL} \int_{LSL}^{USL} k(\xi) q(\xi_{изм} - \xi) dy d\xi}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{LSL}^{USL} k(\xi) q(\xi_{изм} - \xi) d\xi_{изм} d\xi}; \quad R_{\text{изг}} = 1 - \frac{\int_{LSL}^{USL} \int_{LSL}^{USL} k(\xi) q(\xi_{изм} - \xi) d\xi_{изм} d\xi}{\int_{LSL}^{USL} k(\xi) d\xi}, \quad (2)$$

где k – плотность вероятности контролируемого параметра; ξ – значение контролируемого параметра; q – плотность вероятности неопределенности измерения; $\xi_{изм}$ – конкретное значение результата измерения для данного экземпляра изделия, для которого рассчитывается индивидуальный риск.

Для проведения расчетов доверительная граница неопределенности измерений принята равной предельно допустимой погрешности измерений $[\Delta] = T/3$. Вид функции распределения технологического рассеяния контролируемого параметра, а также значений её оценок – математического ожидания и дисперсии обуславливаются характером производства контролируемых изделий, точностью и стабильностью технологических операций и т.п. Данные расчеты производились для нормального, равновероятного, треугольного и трапециевидного распределений (с отношением оснований, верхнего к нижнему, $\beta = 1/2; 1/3; 2/3$) технологического рассеяния контролируемого параметра. Выбор распределений, качественно характеризующих неопределенность измерений (случайная составляющая результата измерений – аналог случайной составляющей погрешности измерений), обусловлен рекомендацией руководства по применению СТБ ИСО/МЭК 17025 «Оценка неопределенности в измерениях». Предложенные там аппроксимации включают следующие распределения: нормальное (Гаусса), равновероятное (прямоугольное), треугольное (Симпсона), трапециевидное и U-образное (арксинуса). Поле рассеяния контролируемого параметра ω принимается равным полю допуска с уровнем доверительной вероятности $P = 0,99$, $T = \omega_p$. Результаты расчетов для средних рисков изготовителя и потребителя представлены в табл. 1.

Результаты расчетов показывают, что для выбора допустимой погрешности контроля в большинстве тривиальных случаев можно использовать общепринятое отношение (1) допустимой погрешности измерений и допуска контролируемого параметра.

составляющей B_x индукции от расстояния точки наблюдения до оси ОХ, то есть – от радиуса r . Аналитический вид данной зависимости с высокой точностью описывается полиномом четвертой степени:

$$B_x/I = -2527r^4 + 5,4172r^3 - 0,0643r^2 + 3 \cdot 10^{-6}r + 0,014233 \text{ (мТл/А)}. \quad (1)$$

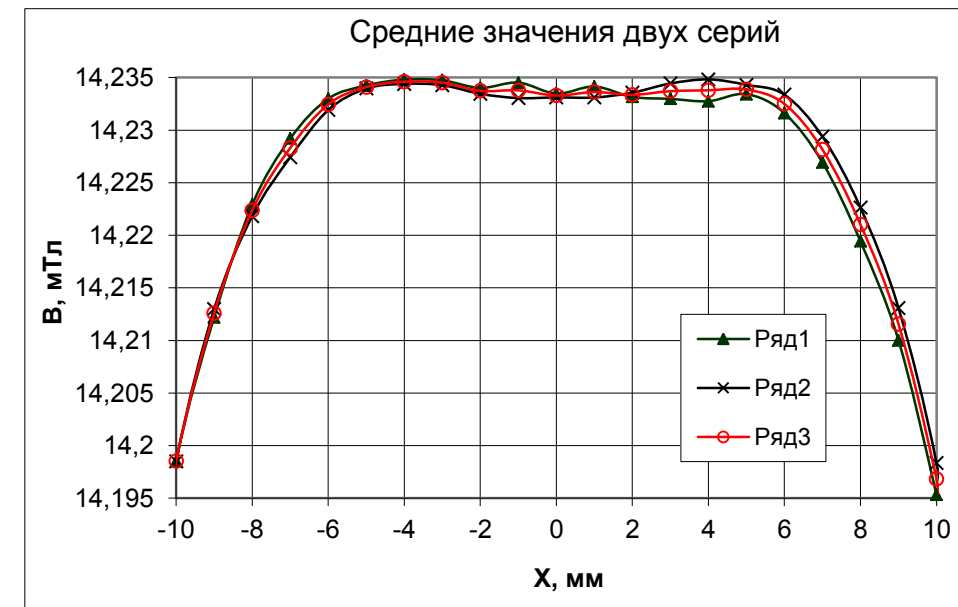


Рис. 1. Распределение вдоль оси ОХ составляющей B_x индукции магнитного поля катушек Гельмгольца

Высокая однородность поля позволила использовать для определения постоянной катушек измеритель Ш1-9. Полученное значение постоянной при 20°C имеет величину: $K_{B20} = 14,223 \text{ (мТл/А)}$, а температурная зависимость характеризуется выражением:

$$K_B = -0,00024 \cdot T_{cp} + 14,2278 \text{ (мТл/А)}, \quad (2)$$

где T_{cp} – средняя температура обмоток, $^\circ\text{C}$.

Приведенные результаты показывают, что экспериментальные и расчетные данные по характеристикам источника полностью совпадают, обеспечиваются заданные диапазоны по частоте поля и величине индукции, по ее однородности в рабочей зоне и по термостабильности параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лухвич, А. А.** Источник магнитной индукции для эталона переменного магнитного поля / А. А. Лухвич, А. П. Гусев, В. Д. Пиунов // Метрология–2014: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2014. – С. 178–179.

Email: gusevap@iaph.bas-net.by
piunov@iaph.bas-net.by

И. С. МЕЛЬНИКОВА, В. И. БОРИСОВ
ГУ ВПО «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Могилев, Беларусь

При постоянном совместном воздействии погодно-климатических факторов и транспортной нагрузки дорожные покрытия подвержены возникновению различных повреждений уже после 2–3 лет с периода строительства. Неровности в виде колеи, трещин, просадок, выбоин снижают долговечность дорог, отрицательно сказываются на эффективности работы автомобильного транспорта [1]. Актуальной является задача выявления повреждений на поверхности дорожных покрытий и их ликвидация на ранней стадии, пока небольшие разрушения не привели к образованию крупных дефектов.

Для обнаружения повреждений конструкции дорожной одежды в Республике Беларусь нашли применение следующие способы [2]:

- комплект георадарного оборудования «Око», позволяющий выявлять дефекты в дорожной одежде и грунтах земляного полотна; принцип работы основан на передаче антенной в исследуемую среду электромагнитного импульса, отражающегося от предметов в ней или от границы раздела сред;
- система дистанционного мониторинга мостовых сооружений, позволяющая контролировать механические напряжения в металлических конструкциях на основе применения магнитоиндукционных датчиков;
- установка ИПМ-1 для определения физико-механических характеристик асфальтобетонов, позволяющая оперативно определять физико-механические свойства дорожно-строительных материалов;
- лаборатория визуального сканирования камерой линейного сканирования (LineScan); принцип работы заключается в непрерывной продольной съемке покрытия высокоскоростной специализированной цифровой камерой с последующей компьютерной обработкой полученных изображений.

Поиск способа получения лучшего контраста изображения и упрощения процесса диагностики и обработки результатов при обследовании дорожных покрытий позволил авторам предложить в качестве альтернативного метода диагностики дорог использовать метод термографии, основанный на применении тепловизора для съемки и визуализации тепловой карты физического объекта благодаря собственному тепловому излучению объекта в инфракрасной области спектра. Применение тепловизоров получило распространение в дорожном строительстве при контроле температуры асфальтобетонной смеси при ее укладке. Экспериментально доказаны некоторые преимущества дан-

З. Ю. ТРЕТЬЯК
УО «БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТРАНСПОРТА»
Гомель, Беларусь

Важную роль в управлении качеством серийно выпускаемой продукции занимает контроль качества. Только на основании результатов контроля изготовитель вправе уверенно судить о качестве и безопасности продукции, поставляемой им на потребительский рынок. Критериями качества процессов контроля продукции являются показатели достоверности или вероятности ошибок контроля. Действительно, идеальное решение задачи контроля состоит в том, чтобы пропустить все изделия, которые удовлетворяют заданным нормам на параметры их качества, и не пропустить негодные по этим параметрам изделия. Объект считают годным по контролируемому параметру ξ , если соблюдается условие $LSL \geq \xi_{изм} \geq USL$, где ξ – действительное значение контролируемого показателя качества объекта, USL – наименьшее предельное значение, LSL – наибольшее предельное значение. На стадии измерительного контроля, значение терминов "соответствует требованиям" и "не соответствует требованиям" усложняется существующей неопределенностью измерения, что приводит к появлению риска изготовителя $R_{изг}$ – признание (по результатам контроля) в действительности годного изделия негодным (дефектным) и риска потребителя $R_{потр}$ – признание в действительности негодного изделия годным. Средние риски потребителя и изготовителя вычисляются при известных законах распределения неопределенности измерения и технологического рассеяния контролируемого параметра.

Измерительный приемочный контроль серийно выпускаемой продукции может проводиться как изготовителем продукции при проведении проверки качества в процессе изготовления продукции и выявлении дефектов, брака в готовой продукции, так и независимой аккредитованной лабораторией при проведении квалификационных, сертификационных испытаний.

Выбор допустимой погрешности измерений является одной из важнейших задач проектирования методики измерительного контроля. Традиционно для случая приемочного контроля объекта по заданному параметру, если заданы два его предельных значения, за допустимую погрешность измерений традиционно принимают такую, которая не превышает 1/3 части допуска (Т) параметра [1]:

$$[\Delta] \leq T/3, \quad (1)$$

Целью исследования является возможность использования интеллектуального метода управления электроприводом по системе ТПН-АД на основе fuzzy регулятора, обеспечивающего минимум тока статора при заданной нагрузке

Выбор fuzzy регулятора обусловлен возможностью современной микропроцессорной техники, кроме функций регулирования, решать другие требуемые и целесообразные задачи управления технологическим процессом, например, обеспечения плавного пуска и останова, защиту в аварийных режимах, мониторинг состояния ЭП и самонастройку.

Предлагается алгоритм оптимального управления fuzzy регулятора по двум легко измеряемым величинам: току I и напряжению U фазы статора.

Временные диаграммы показывают, что fuzzy регулятор правильно отрабатывает управление ТПН-АД и электропривод (ЭП) работает при сниженном напряжении АД, что проявляется в снижении тока статора. Благодаря этому ток статора, по сравнению с ЭП работающим с номинальным напряжением, уменьшается в 1,5 раза, при этом, естественно, снижаются как потери в обмотках статора, так и за счет снижения напряжения в стали. Скорость ЭП с fuzzy регулятором при этом отличается от скорости разомкнутой системы на 1 %, что несущественно.

Результаты моделирования подтверждают эффективность применения предложенного fuzzy управления ЭП ТПН-АД, работающего со сниженной нагрузкой.

ного способа по сравнению с обычной фиксацией изображения покрытия цифровыми фото- и видеокамерами, например, при выявлении мелких трещин шириной раскрытия 1–2 мм [3], однако, в диагностике дорог тепловизионный контроль недостаточно развит.

Авторами проведены исследования с применением метода конечных элементов: создавалась математическая модель слоя асфальтобетонного покрытия с поверхностными повреждениями, схема которого приведена на рис. 1. Рассматривались наиболее распространенные повреждения покрытия – трещины шириной раскрытия от 1 до 25 мм и глубиной от 2 до 20 мм. Градиент температуры с глубиной слоя покрытия задавался на основании экспериментальных данных по существующей дороге в зависимости от времени года и с учетом суточных колебаний температуры покрытия [4]. Результаты математического моделирования при оценке температурного поля в слое асфальтобетонного покрытия показали, что различие в абсолютных значениях температуры на поверхности дорожного покрытия и на дне трещин составляет от 0,8 до 4 °С.

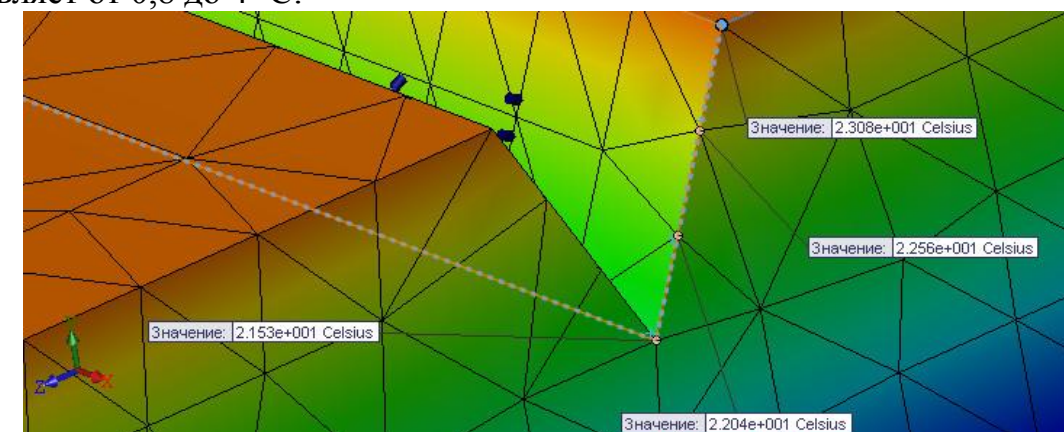


Рис. 1. Распределение температурного поля внутри трещины шириной раскрытия 20 мм и глубиной 20 мм

Авторами проведены лабораторные исследования асфальтобетонных образцов с различными дефектами и экспериментальные исследования на дорожном асфальтобетонном покрытии с трещинами. При испытаниях использовался тепловизор длинноволнового спектра с неохлаждаемой матрицей EasIRTM-4. В лаборатории был обеспечен постоянный нагрев образца снизу с использованием разработанной и собранной авторами установки с нагревательным элементом. Температура нагревательной пластины установки, а также режимы нагрева/охлаждения, регулировались микроконтроллером. Контроль температуры на пластине и по высоте образца осуществлялся датчиками температуры, контроль тепловизором – сверху перпендикулярно поверхности образца.

В качестве исследуемых образцов изучались асфальтобетонные образцы цилиндрической формы и формы прямоугольного параллелепипеда с трещинами шириной от 0,5 до 5 мм и глубиной от 5 мм до 9,5 см (в зави-

симости от высоты образца). Трещины в образцах-балочках шириной до 1 мм были образованы естественным образом, в цилиндрических образцах – моделировались в виде искусственных дефектов (пропилов шириной 4–5 мм и глубиной от 10 до 95 мм). Результаты регистрации термограмм приведены на рис. 2 и 3. По полученным термограммам можно сделать вывод об удовлетворительном выявлении трещин раскрытием от 0,7 мм, дефекты выявляются с высоким контрастом.

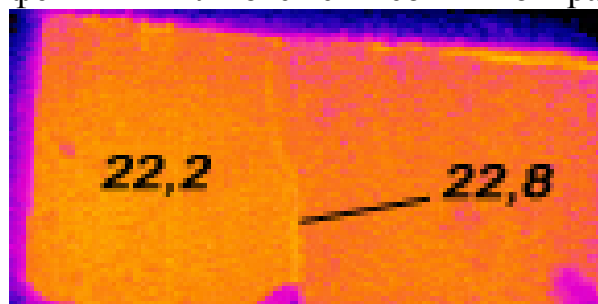


Рис. 2. Термограмма образца с трещиной шириной раскрытия 0,7 мм

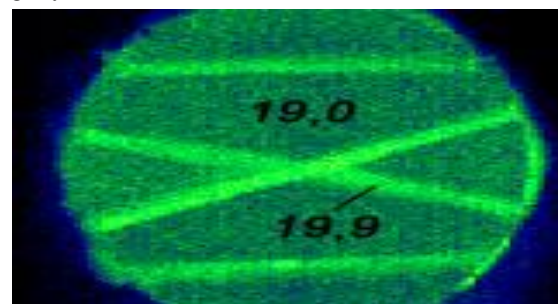


Рис. 3. Термограмма образца с поверхностной трещиной шириной 4 мм

Таким образом, для обнаружения поверхностных повреждений дорожных асфальтобетонных покрытий на ранней стадии их возникновения, целесообразно применять способ термографии. Дальнейшие экспериментальные исследования направлены на поиск оптимальных условий обнаружения дефектов приборными и методическими приемами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Леонович, И. И.** Диагностика и управление качеством автомобильных дорог: учеб. пособие / И. И. Леонович, С. В. Богданович, И. В. Нестерович. – Минск : Новое знание, 2011. – 350 с.
2. **Мельникова, И. С.** Диагностика повреждений дорожных покрытий / И. С. Мельникова // Архитектура, градостроительство, историко-культурная и экологическая среда городов центральной России, Украины и Беларуси: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Брянск, 12–13 марта 2014. – Брянск, 2014. – С. 270–273.
3. **Monem, T.A.** Asphalt crack detection using thermography / T. A. Monem, A. A. Olufa, H. Mahgoub // Inframation. – 2005. – Vol. 6. – p. 139–150.
4. **Мельникова, И. С.** Моделирование воздействия температуры и транспортных нагрузок на возникновение и развитие трещин в асфальтобетонных дорожных покрытиях / И. С. Мельникова // Наука и техника. – 2012. – № 4. – С. 44–52.

E-mail: rin_m@mail.ru

УДК 621.313 УЛУЧШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

В. А. СЕЛИВАНОВ
ГУ ВПО «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Могилев, Беларусь

Проблема экономии электроэнергии, потребляемой асинхронными двигателями, в настоящее время является весьма актуальной в связи с широким распространением нерегулируемых по скорости асинхронных двигателей (АД). Недоиспользование установленной мощности АД из-за особенностей технологии, а также вследствие завышения установленной мощности двигателей на рабочих машинах и недогрузки двигателей во время вспомогательных операций приводит к резкому снижению энергетических показателей электроприводов и большим потерям электроэнергии.

Одним из перспективных путей уменьшения этих потерь является автоматическое регулирование напряжения на статоре двигателя в функции его нагрузки, осуществляемого посредством оптимального управления, минимизирующего потери или потребляемый двигателем ток.

Проведенные исследования показывают, что среднесуточная нагрузка установок далека от номинальной и в течение большей части времени электродвигатели работают со значительной недогрузкой, то есть со сниженным КПД, потребляя реактивную мощность. Улучшить энергетические показатели недогруженного асинхронного двигателя можно за счет снижения питающего напряжения, обеспечивающего уменьшение намагничивающего тока, потерь в меди и стали. Регулирование напряжения статора может быть обеспечено полупроводниковым преобразователем. Для модернизации целесообразно использовать электропривод, построенный по системе – тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель (ТПН-АД).

Известно, что близкие к минимуму значения потерь могут быть обеспечены поддержанием скорости соответствующей оптимальному скольжению $s_{\text{опт}}$, а также минимизацией тока статора при заданной нагрузке. Для поддержания постоянства оптимального скольжения требуется система автоматического регулирования с датчиком скорости, в то время как минимизация тока статора, обеспечивающая близкие к минимуму потери, не требует введения в ЭП вышеуказанного датчика. Достоинством вышеупомянутого способа регулирования, кроме снижения потерь в электродвигателе, является также снижение их в силовых соединительных проводах, согласующих трансформаторах, силовой коммутационной аппаратуре и др.

для данной стали в соответствии с калибровочной характеристикой, соответствует снижению остаточных напряжений сжатия. Последующее быстрое снижение величины ШБ говорит о наличии под наклепанным слоем небольшого растянутого слоя, что определяется уравнением равновесия образца. Последующее удаление поверхностного слоя не оказывает заметного влияния на ШБ и свидетельствует о полном удалении деформированного поверхностного слоя, величина которого, в данном случае, не превышает 40–50 мкм. Описанная кинетика изменения ШБ по мере удаления слоя подтверждается анализом поведения поперечной компоненты ШБ (рис. 1, б). Рост, а затем незначительно снижение последней свидетельствуют о первоначальном снижении напряжений сжатия, возникших при наклепе, после чего следуют небольшое снижение интенсивности ШБ, связанное с уменьшением компенсирующих наклеп напряжений растяжения (не равных продольным компенсирующим растягивающим напряжениям из-за неодинаковых граничных условий НДС в обоих направлениях) и стабилизация поведения ШБ после глубины 40–50 мкм.

Таким образом, электролитическое удаление поверхностного деформированного слоя, характеризующегося значительным градиентом напряжений, позволяет уменьшить, по сравнению с подготовкой механическим шлифованием, неопределенность измерения внутренних напряжений по изменению параметров магнитных шумов Баркгаузена. Толщина деформированного предшествующей обработкой поверхностного слоя металла, как правило, мала по сравнению с толщиной образца. Поэтому вызываемые этим слоем изменения напряжений в объеме металла, хотя и незначительные, но приводят к значительной неопределенности измерения напряжений методом эффекта Баркгаузена, или любым другим методом контроля, характеризующимся влиянием состояния поверхностного слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Sablik, M. J.** Modeling the Effects of Biaxial Stress on Magnetic Properties of Steels with Application to Biaxial Stress NDE / M. J. Sablik – Nondestructive Testing and Evaluation. – Vol. 12 – No. 2, 1995 – P. 87–102.
2. **Vengrinovich, V. L.** Belarus Patent No. BY 15012, C1, 2011. Method for Calibration of the Barkhausen Noise Sensitivity to Elastic Stress and Residual Strain in Ferromagnetic Material.
3. Vengrinovich V.L., Vintov D.A., Dmitrovich D.V. Non-destructive testing of biaxial stress state in ferromagnetic materials. Proceedings of the American Institute of Physics ed. by D.Chimenti, L.Bond and D.Tohmson, 2013, Baltimore, Maryland, USA.

УДК 620.179

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЗАГОТОВОК ПРОКАТА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

В. В. НОСОВ

ФГБОУ ВПО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ
УНИВЕРСИТЕТ «ГОРНЫЙ»»
Санкт-Петербург, Россия

Процесс производства проката включает процесс пластической деформации материала заготовки, при котором дефекты заготовки могут трансформироваться, развиваться, наоборот уменьшаться или полностью удаляться в процессе прокатки. Контроль наличия дефектов в заготовках для производства горячекатаной полосы является одним из основных условий производства проката должного уровня качества [1–4].

Для решения этих проблем предложен способ контроля дефектов сляба для производства горячекатаной полосы [5], рис. 1, включающий инициирование акустической эмиссии путем механического диагностического нагружения сляба за счет использования собственного веса сляба до напряжений от 20 до 80 % предела текучести материала сляба, выдержку под нагрузкой не менее 1 мин, регистрацию и обработку результатов регистрации сигналов акустической эмиссии, отличающийся тем, что на первом этапе определяют допустимое значение диагностического параметра:

$$\omega_{\text{зкр}} = \ln(\tau_0/\theta_T) + U_0/KT \approx 20 \div 30,$$

где $\tau_0 = 10^{-12} \div 10^{-14}$ с – период атомных колебаний; θ_T – время технологического воздействия валка на раскатываемую часть листа (уточняется по технологическим данным или расчетным путем); $U_0/KT = 50 \div 59$; U_0 – энергия активации процесса разрушения; K – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура, и далее при обработке сигналов с датчиков определяют значение диагностического параметра:

$$W_{AE} = \omega_T = \frac{\gamma \sigma_T}{KT} = \frac{(\ln \xi_2 - \ln \xi_1)}{K_{H2} - K_{H1}}$$

где ξ_1, ξ_2 – значения первичного информативного акустико-эмиссионного параметра при максимальных напряжениях в сечении $\sigma_{\text{max } 1}, \sigma_{\text{max } 2}$ в слябе при диагностическом нагружении в разный момент времени; K_{H1} и K_{H2} – коэффициенты нагрузки, определяемые по формулам:

$$K_{H2} = \frac{\sigma_{\text{max } 2}}{\sigma_T} \quad K_{H1} = \frac{\sigma_{\text{max } 1}}{\sigma_T}$$

где σ_T – предел текучести материала, сравнивают диагностический параметр $W_{AЭ}$ с допустимым значением диагностического параметра $[W_{AЭ}]$ и при $W_{AЭ} > [W_{AЭ}]$ сляб считают непригодным для дальнейшей прокатки. Значение времени технологического воздействия Θ_T берётся из данных по технологии или может быть рассчитано по данным схемы (рис. 2)

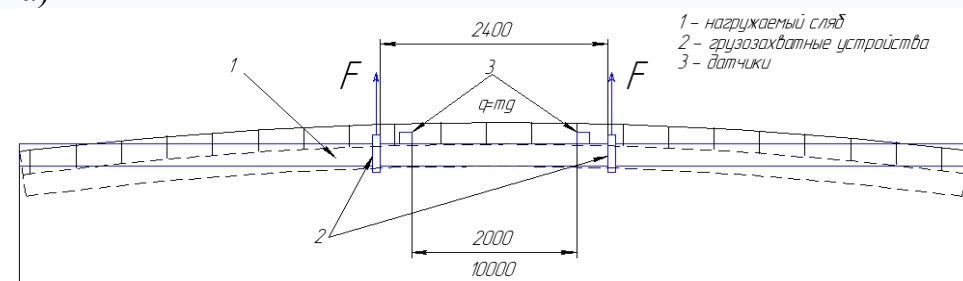
$$\theta \approx \frac{L}{V} = 0,1 \div 1,$$

где L – длина участка сляба, находящегося под воздействием валков; V – скорость рабочей поверхности вала, рассчитываемая из параметров оборудования и условий процесса прокатки

$$L = D \sin(\arccos(1 - \frac{H-h}{2D})),$$

где D – диаметр рабочей поверхности валков; H – толщина сляба до обработки; h – толщина сляба после обработки.

а)



б)

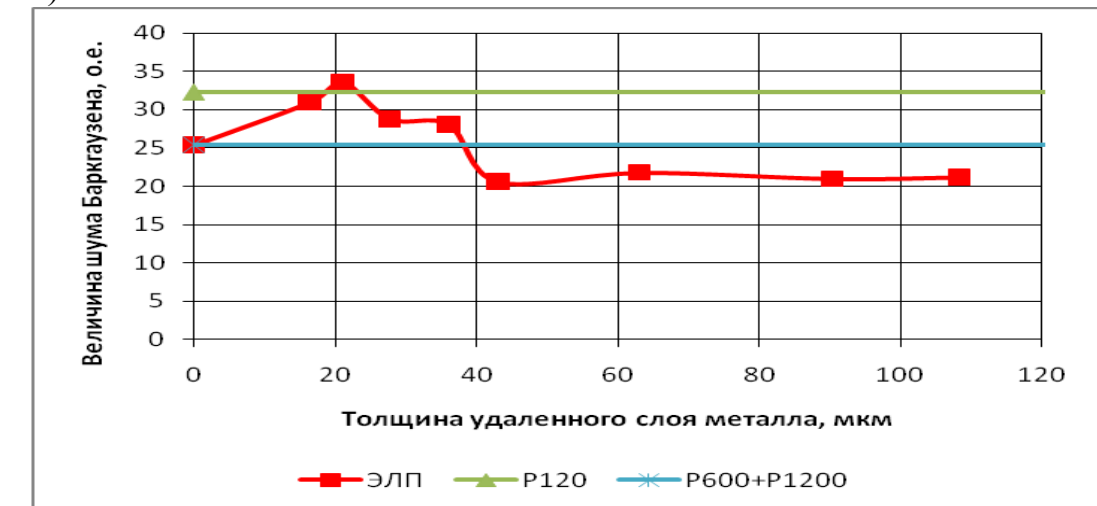


Рис. 1. Схема (а) и вид (б) нагружения промышленной заготовки: 1 – заготовка; 2 – захваты нагружающего устройства; 3 – преобразователи АЭ

$$V = \frac{n \cdot D \cdot \pi}{i \cdot 60 \cdot 1000},$$

где n – частота вращения двигателя; i – передаточное отношение привода.

а)



б)

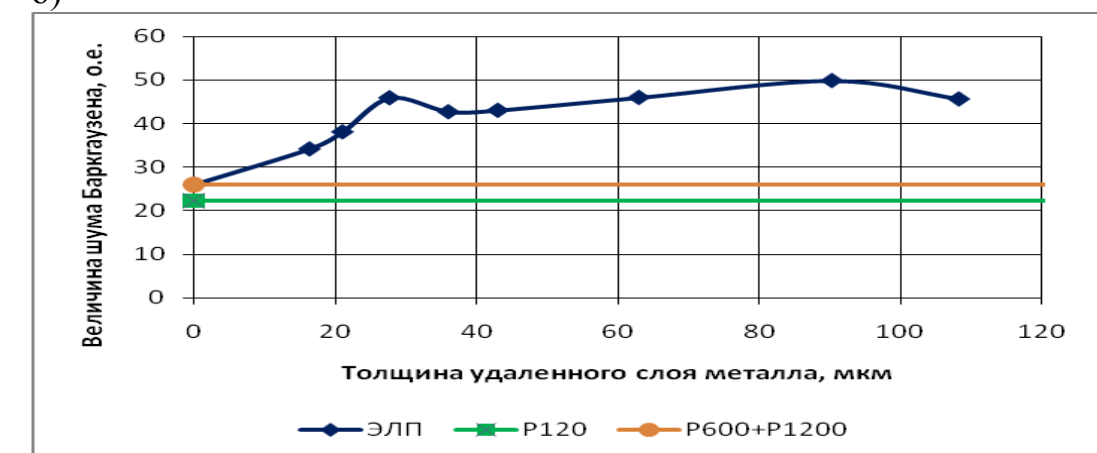


Рис. 1. Параметры шумов Баркгаузена после различных видов обработки: а – в направлении параллельном продольной оси трубы; б – в направлении перпендикулярном продольной оси трубы (ЭЛП – электролитическое полирование методом Жаке (тампоном); P120 – шлифование абразивом зернистостью P120 при 2000 об/мин; P600+P1200 – шлифование абразивом зернистостью P600 и P1200 при 6000 об/мин)

Критерием достаточности при удалении деформированного слоя служило отсутствие заметных изменений ШБ при последующей полировке. Режимы контроля: частота и амплитуда намагничивания, диапазон частот анализа магнитного шума выбирались из условия обеспечения максимальной чувствительности к изменению напряжений (соответствующая калибровочная характеристика не приведена). Из рис. 1 следует, что шлифование абразивами указанных зернистостей не приводит к измеримому изменению состояния поверхностного слоя. В тоже время электролитическая полировка, при которой происходит реальное удаление деформированного поверхностного слоя, оказывает заметное влияние на величину ШБ. По мере удаления слоя продольная компонента ШБ сначала возрастает, что

УДК 620.179
ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФОРМИРОВАННОГО СЛОЯ
МЕТАЛЛА НА ПАРАМЕТРЫ МАГНИТНОГО ШУМА БАРКГАУЗЕНА

А.Н. ПРУДНИКОВ, *Д.А. ВИНТОВ, *В.Л. ВЕНГРИНОВИЧ,
П.А. ПОДУГОЛЬНИКОВ
ГУ ВПО «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
*ГНУ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»
Могилев, Минск, Беларусь

Проведение измерений параметров шумов Баркгаузена (ШБ), характеризующих напряженно-деформированное состояние металла [1, 2, 3] на длительно эксплуатирующихся объектах требует предварительной подготовки поверхности металла для удаления покрытий, поверхностных дефектов, коррозионных повреждений. Однако, как известно, при механической обработке как электрифицированным так и ручным инструментом происходит образование поверхностных деформированных слоев металла - псевдоаморфного слоя (слой Бейльби), слоя глубокой деформации, слоя крупномасштабной деформации. Эти слои характеризуются наличием напряжений сжатия (наклеп), что отличает их по своим свойствам от остального металла и не характеризует состояние нижележащих слоев и металла в целом.

Поэтому, для измерения истинных напряжений на поверхности металла необходимо ликвидировать остаточные напряжения и наклеп, неотделимые от механических методов чистовой обработки. Уменьшить искажение поверхности можно электрохимическим полированием металла, при котором одновременно со сглаживанием выступов микронеровностей частично удаляется напряженный слой металла. В полевых условиях для подготовки небольших участков на крупных объектах наиболее подходящим способом является предложенный Жаке метод тампона. Состав электролита и режим полирования подбирают так, чтобы толщина гидроокисной пленки поддерживалась неизменной, исключая перетравливание металла агрессивным электролитом.

В проведенных экспериментах по оценке влияния поверхностного деформированного слоя металла на параметры магнитного шума Баркгаузена в трубных образцах из стали 17ГС использовался фосфорносернокислый раствор электролита. Анодная плотность тока составляла 50–60 А/дм², что обеспечивало скорость растворения металла около 3 мкм/мин. Измерения выполнялись прибором ИНТРОСКАН, значения параметров магнитного шума Баркгаузена в параллельном и перпендикулярном направлении относительно оси трубного образца представлены на рисунке 1, а и 1, б соответственно.

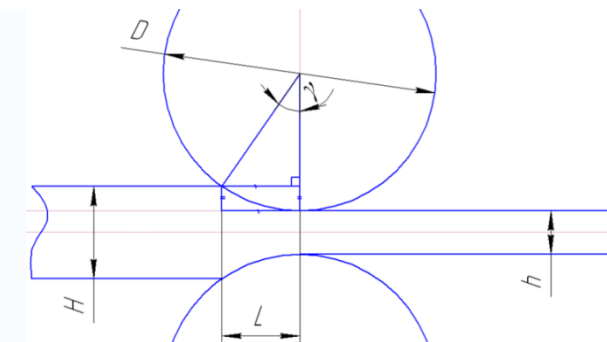


Рис. 2. Схема технологического воздействия на заготовку при изготовлении листа

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Добронравов, А. И.** Классификация дефектов поверхности горячекатаного плоского стального проката / Добронравов А. И., Карпов Е. В. – Магнитогорск : Магнитогорский дом Печати. – Ч. 1. – 133 с.
2. Дефекты стальных слитков и проката: справ. издание / В. В. Правосудович [и др.]. – М. : Интермет Инжиниринг, 2006. – 348 с.
3. **Пат. 2404872 РФ, МПК⁸ В 21 В 38/00, G 01 N 29/14** Способ контроля сляба для производства горячекатаной полосы / В. В. Носов, В. Г. Лаврин; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «СПб. госуд. политехн. ун-т». – № 2009127637/02; заявл. 17.07.09, опубл. 27.11. 10, Бюл.№ 33.
4. **Носов, В. В.** Неразрушающий контроль качества заготовок для горячекатаной полосы методом акустической эмиссии / В. В. Носов, А. П. Жильцов, В. Г. Лаврин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. – 2010. – № 4. – С. 170–174.
5. **Носов, В. В.** Неразрушающий контроль качества заготовок для производства горячекатаной полосы методом акустической эмиссии / В. В. Носов, В. Г. Лаврин // Дефектоскопия. – 2012. – № 3. – С. 18–26.

В. В. НОСОВ, А. И. ПОТАПОВ, В. А. ГОМЕРА
ФГБОУ ВПО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ
УНИВЕРСИТЕТ «ГОРНЫЙ»»
Санкт-Петербург, Россия

Слабая прогнозируемость поведения сварных соединений сосудов давления привела к необходимости разработки методов прогнозирования разрушения на основе развития экспериментальных методов фиксации повреждений, положений механики разрушения, использования результатов микроструктурных исследований и физики прочности [1, 2]. Для этого случая был предложен метод оценки ресурса сосудов давления на основе использования явления акустической эмиссии (АЭ).

Метод АЭ обычно используется здесь совместно с другими методами неразрушающего контроля (рис. 1). При этом опасным считается дефект, максимальный эквивалентный размер которого превышает некоторое допустимое значение. На основе проведенных экспериментов были получены сигналы АЭ в момент равномерного нагружения сосудов давления. Наиболее важным с прогностической точки зрения является этап, при котором происходят однородные разрушения в структуре металла. Сигналы, получаемые при этом, несут информацию о прочности и надежности сварных соединений сосудов давления (рис. 2).

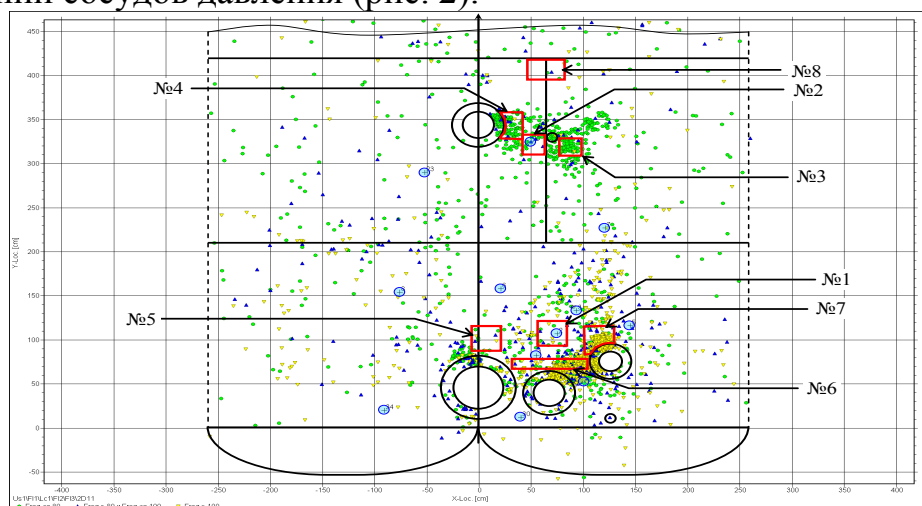


Рис. 1. Результаты АЭ локации нижних поясов абсорбера очистки сероводорода

На графике локации источники АЭ распределены по средней частоте сигналов. Контурами отмечены участки, на которых проводился УЗК различного вида.

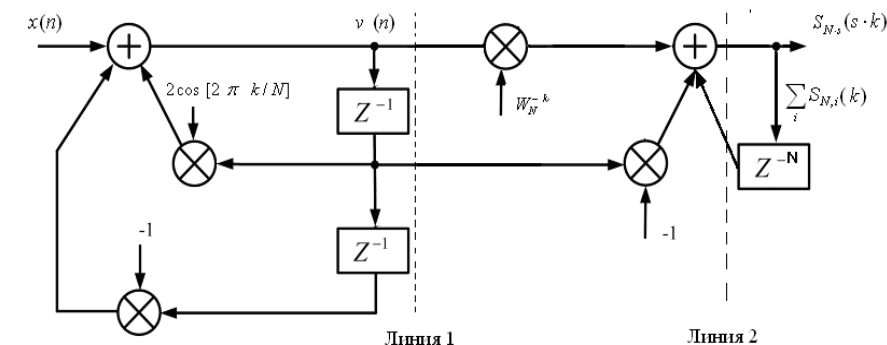


Рис. 1. Структура БИХ-фильтра, реализующего обобщенный алгоритм Герцееля

Последовательность выполнения операций в обобщенном алгоритме Герцееля и их число при длительности блока N отсчетов, числе блоков s следующая: операции слева от пунктирной линии 1 выполняются N раз для каждого блока; операции между линиями 1 и 2 выполняются один раз после обработки каждого блока; операции справа от пунктирной линии 2 выполняются s раз по числу блоков.

Введенная авторами процедура ЦБОН позволяет стандартным фильтром Герцееля, обрабатывающим блоки по N отсчетов, вычислять значение ks -го бина Ns -точечного ДПФ. При этом обеспечивается:

- высокая разрешающая способность цифровой спектральной обработки за счет увеличения длительности обрабатываемого входного сигнала до Ns отсчетов;
- устойчивость работы фильтра за счет выполнения «обнуление» всех внутренних регистров памяти в начале обработки каждого блока в N отсчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Серебренников, М. Г.** Выявление скрытых периодичностей / М. Г. Серебренников, А. А. Первозванский. – М. : Наука, 1965. – 244 с.
2. **Оппенгейм, Э.** Применение цифровой обработки сигналов / Э. Оппенгейм. – М. : Мир, 1980. – 552 с.
3. Неразрушающий контроль: справочник в 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2007. – Т. 7. – 829 с.
4. **Лайонс, Р.** Цифровая обработка сигналов: пер. с англ. / Р. Лайонс. – 2-е изд. – М. : ООО «Бином-Пресс», 2007. – 656 с.
5. **Пономарев, В. А.** Теория и применение параметрического дискретного преобразования Фурье / В. А. Пономарев, О. В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов. – 2011. – № 1. – С. 2–6.
6. **Пономарева, О. В.** Быстрое параметрическое дискретное преобразование Фурье действительных последовательностей / О. В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов. – 2012. – № 2. – С. 2–5.

Существенный недостаток алгоритма Герцеля заключается в том, что фильтр находится на грани устойчивости, так как его полюс расположен на единичной окружности z -плоскости. Если за счет округления коэффициентов фильтра полюс выйдет за пределы единичной окружности, то фильтр Герцеля теряет устойчивость. Известный метод борьбы с указанным недостатком – обработка сигналов блоками длительностью в N отсчетов и обнуление внутренних регистров вначале обработки каждого нового блока данных [4]. Таким образом, устойчивость алгоритма Герцеля обеспечивается *сокращением обрабатываемой длительности входного сигнала до N отсчетов* (при этом как отмечено в [4] N может измеряться сотнями).

Допустим необходимо вычислить коэффициенты ДПФ от последовательности $x(n)$, длительностью в $n=0, s \cdot N - 1$ отсчетов. Согласно (1), значение $(k \cdot s)$ -го бина ДПФ при длительности сигнала $(N \cdot s - 1)$ отсчетов равно:

$$S_{N \cdot s}(s \cdot k) = \sum_{n=0}^{(s \cdot N - 1)} x(n) W_{N \cdot s}^{k \cdot s \cdot n}, \quad k = 0, (N \cdot s - 1), \quad s = 1, 2, \dots, \quad W_N^{k \cdot n} = \exp(-j \frac{2\pi}{N} kn). \quad (2)$$

Так как дискретные экспоненциальные функции (ДЭФ) $def(k, n) = W_N^{k \cdot n}$ обладают свойством периодичности: $def(k, n \pm rN) = def(k, n)$, $r = 0, 1, 2, \dots$, то сумму (2) можно представить в виде s сумм:

$$S_{N \cdot s}(s \cdot k) = \sum_{n=0}^{(N-1)} x(n) W_N^{kn} + \sum_{n=0}^{N-1} x(n+N) W_N^{kn} + \dots + \sum_{n=0}^{N-1} x(n+(s-1) \cdot N) W_N^{kn}. \quad (3)$$

Следовательно, возможна своеобразная процедура блочной обработки отсчетов входного сигнала, которую авторы назвали **цифровой блочной обработкой с накоплением (ЦБОН)**. Поясним пошагово процедуру ЦБОН.

1. Разбиваем исходный сигнал на s блоков по N отсчетов в каждом.
2. Блок 1 $\Rightarrow [x(0), \dots, x(N-1)]$, ... Блок $s \Rightarrow [x((s-1)N), \dots, x(s \cdot N - 1)]$.
3. Вычисляем k -е коэффициенты ДПФ каждого блока согласно (1):

$$S_{N,1}(k) = \sum_{n=0}^{(N-1)} x(n) \cdot W_N^{kn}, \dots, S_{N,s}(k) = \sum_{n=0}^{(N-1)} x(n+(s-1) \cdot N) \cdot W_N^{kn}.$$
4. Суммируем полученные значения k -х коэффициентов ДПФ: $S_{N \cdot s}(s \cdot k) = \sum_{i=1}^s S_{N,i}(k)$.

Опираясь на полученные результаты, можно выполнить **обобщение алгоритма Герцеля** для целых значений переменной k (переменная k «отвечает» в фильтре Герцеля за частоту) введя процедуру ЦБОН. Обобщенный алгоритм Герцеля можно реализовать в виде БИХ-фильтра, структура которого приведена на рис. 1.

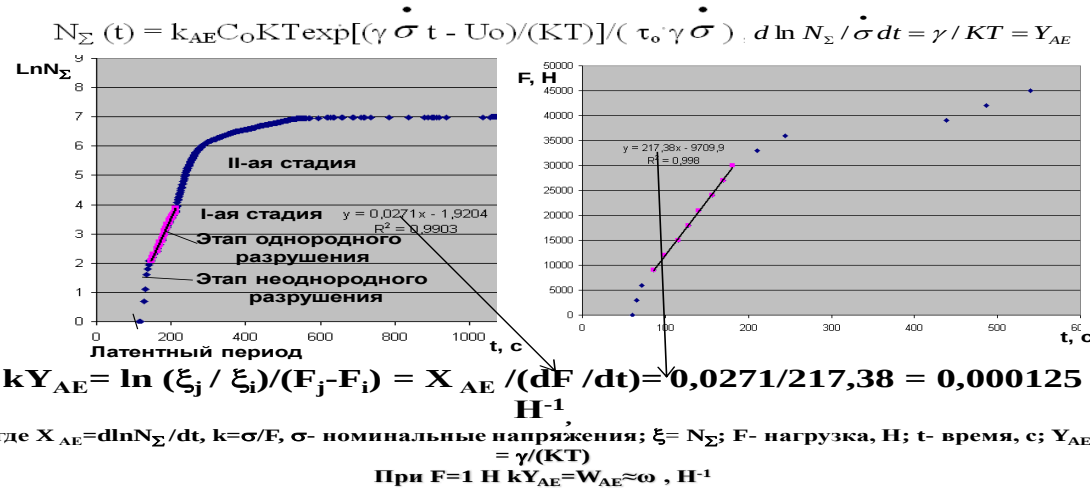


Рис. 2. Алгоритм оценки АЭ-показателей прочности сварных соединений

Измерения параметров АЭ проводят при нагружении объекта контроля внутренним давлением до определенной величины и в процессе выдержки давления на определенных уровнях. При этом максимальное испытательное давление ($P_{исп}$) должно быть больше рабочего давления (эксплуатационной нагрузки) не менее чем на 5...10 %, но не должно превышать пробного давления ($P_{пр}$).

Основанная на микромеханической модели АЭ методика оценки параметров состояния X_{AE} , Y_{AE} дает возможность оценки остаточного ресурса и хорошую корреляцию с площадью A дефектов, выявленных ультразвуковым методом (табл. 1, 2).

Табл. 1. Корреляция значений параметров АЭ, коэффициента запаса прочности и остаточного ресурса различных поясов гидронагружаемого абсорбера*

Номер пояса	Каналы АЭ	$N_{сумм}$	$N_{ср}$	$X_{AE ср}, c^{-1}$	Коэффициент запаса статической прочности минимальный	Остаточный ресурс максимальный, лет	Остаточный ресурс минимальный, лет
1	26,27,29,32,33	425	85	0,0000616	71,56862745	2580,577	2569,577
2	9,28,31	305	101,6667	0,000273333	26,70731707	1831,887	1820,887
3	10,11,14,25	1727	431,75	0,000779	25,17241379	1771,83	1760,83
4	12,13,15	1207	402,3333	0,000759	27,51256281	1861,433	1850,433
5	16	294	294	0,0011	19,72972973	1509,854	1498,854
6	17,18,19,21,22	3314	662,8	0,001131	13,35365854	1060,436	1049,436
7	7,20,23	1967	655,6667	0,0011	8,76	597,7076	586,7076
8	1,2,3,4,5,6,8,24,30	13521	1502,333	0,006124	2,257731959	4,918982	-6,08102
Коэффициент корреляции с номером пояса		0,885838	0,931684666	-0,85392244	-0,95492	-0,95492	-0,95492

*Номер пояса нумеруется сверху вниз
 $N_{сум}$ – суммарное число сигналов, зафиксированное всеми каналами пояса
 $N_{ср}$ – среднее число импульсов, зарегистрированное каналом пояса
 $X_{AE ср} = d \ln N_{\Sigma} / dt$ – среднее значение диагностического параметра

Табл. 2. Корреляция значений параметров АЭ и данных УЗК-контроля

Участок	№ ПАЭ	Глубина де-фекта, (мм) (УЗК)	Площадь расслоения А, м ² (УЗК)	X _{АЭ} 10 ³ , с-1	N _У .
№1	2	9,0-12,0	0,24	7,21	1510
№3	20	10,9-21,0	0	2,5	1241
№4	23	8,5-20,0	0	0,8	664
№5	1	9,0-12,0	0,16	7,75	2116
№6	4	9,0-12,0	0,1	7,74	1809
№7	5	9,0-12,0	0,16	6,86	1480
	30			9,7	1461
№1	3			4,94	2116
Коэффициенты корреляции					
А-Х _{ае}			А-N _У		
0,842495			0,621265		

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Носов, В. В.** Оценка прочности сосудов давления методом акустической эмиссии / В. В. Носов, И. Н. Бураков // Науч.-техн. ведомости СПбГТ. – 2003. – № 3 (33). – Вып. 7. – С. 210–218.

2. **Носов, В. В.** Диагностика машин и оборудования : учеб. пособие / В. В. Носов. – 2-е изд. перераб. и доп. – СПб. : Изд-во «Лань», 2012. – 384 с.

УДК 621.372.542
МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ СКРЫТЫХ ПЕРИОДИЧНОСТЕЙ
В ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛАХ НА ОСНОВЕ
ДИСКРЕТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

О. В. ПОНОМАРЕВА, А. В. ПОНОМАРЕВ, В. А. ПОНОМАРЕВ
ФГБОУ ВПО «ИЖЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. М. Т. Калашникова»
Ижевск, Россия

В различных областях научных исследований часто приходится сталкиваться с цифровой обработкой случайных сигналов, содержащих «скрытые» гармонические (тональные) компоненты (решение так называемой задачи выявления скрытых периодичностей [1, 2]). Например, в пассивной гидролокации анализ таких сигналов осуществляется при решении задачи обнаружения и классификации как надводных, так и подводных судов [3].

Целью настоящей работы является разработка метода и алгоритма, обеспечивающих:

- высокую разрешающую способность цифровой обработки;
- устойчивость выбранной дискретной системы фильтрации;
- минимум времени цифровой обработки и объема необходимой памяти для ее осуществления.

Одним из эффективных алгоритмов получения фиксированного числа бинов дискретного преобразования Фурье (ДПФ) является фильтр Герцеля. Данный алгоритм, широко применяемый при декодировании DTMF сигналов (DTMF - Dual Tone Multi Frequency), позволяет эффективно вычислить значение k -го бина N -точечного ДПФ [2, 4]:

$$S_N(k) = \sum_{n=0}^{(N-1)} x(n) \cdot W_N^{kn}, \quad W_N^{k \ n} = \exp(-j \frac{2\pi}{N} kn) . \tag{1}$$

Фильтр Герцеля [4], используется нестандартно, не как обычный фильтр, в котором запоминаются все выходные отсчеты. В алгоритме Герцеля обработка проводится блоками в N отсчетов при этом вычисляется и запоминается только каждое N значение выходного отсчета. Заметим, что именно отказ от получения всех промежуточных выходных отсчетов обеспечивает алгоритму Герцеля возможность экономии в числе вычислений по сравнению с определением k -го коэффициента ДПФ $S_N(k)$ «в лоб», согласно соотношению (1).

При комплекснозначном входном сигнале алгоритм Герцеля позволяет примерно вдвое сократить число операций по сравнению с алгоритмом ДПФ. Для действительногозначного входного сигнала как алгоритм ДПФ, так и алгоритм Герцеля позволяют получить дополнительную экономию в вычислениях по сравнению с комплекснозначным входным сигналом [5, 6].

3. Вычисляем k -ые коэффициенты ДПФ-П каждого блока согласно (2):

$$S_{N,1}(k, \theta) = \sum_{n=0}^{(N-1)} x(n) \cdot W_N^{(k+\theta)n}, S_{N,2}(k, \theta) = \sum_{n=0}^{(N-1)} x(n+N) \cdot W_N^{(k+\theta)n}, \dots,$$

$$S_{N,s}(k, \theta) = \sum_{n=0}^{(N-1)} x(n+(s-1) \cdot N) \cdot W_N^{(k+\theta)n},$$

4. Проводим фазовые повороты k -ых коэффициентов ДПФ-П i -ых блоков путем их умножения на фазовый коэффициент $\{\exp(-j2\pi\theta)\}^i$:

$$S_{N,1}^{\circ}(k, \theta) = \exp(-j2\pi\theta) \cdot S_{N,1}(k, \theta), S_{N,2}^{\circ} = [\exp(-j2\pi\theta)]^2 \cdot S_{N,2}(k, \theta), \dots$$

$$S_{N,s}^{\circ}(k, \theta) = [\exp(-j2\pi\theta)]^s \cdot S_{N,s}(k, \theta).$$

5. Суммируем полученные значения k -ых коэффициентов ДПФ-П i -ых блоков:

$$S_{N \cdot s}(s \cdot k) = \sum_{i=1}^s S_{N,i}^{\circ}(k, \theta).$$

Полученный результат в точности совпадает с m -м коэффициентом ДПФ-П (21) ($m = (s \cdot k, s \cdot \theta)$), в чем также несложно убедиться.

Предлагаемая авторами процедура модификации ЦБОН позволяет, обрабатывая фильтром Герцеля блоки по N , выполнить **обобщение алгоритма Герцеля**, обеспечивающее решение поставленных выше задач: высокую разрешающую способность цифровой спектральной обработки; за счет увеличения длительности обрабатываемого входного сигнала до Ns отсчетов; устойчивость работы фильтра, за счет выполнения «обнуление» всех внутренних регистров памяти в начале обработки каждого блока в N отсчетов [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Серебренников, М. Г.** Выявление скрытых периодичностей / М. Г. Серебренников, А. А. Первозванский. – М. : Наука, 1965. – 244 с.
2. **Оппенгейм, Э.** Применение цифровой обработки сигналов / Э. Оппенгейм. – М. : Мир, 1980. – 552 с.
3. Неразрушающий контроль: справочник в 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2007. – Т. 7. – 829 с.
4. **Лайонс, Р.** Цифровая обработка сигналов: пер. с англ. / Р. Лайонс. – 2-е изд. – М. : ООО «Бином-Пресс», 2007. – 656 с.
5. **Пономарев, В. А.** Теория и применение параметрического дискретного преобразования Фурье / В. А. Пономарев, О. В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов. – 2011. – № 1. – С. 2–6.
6. Пономарева, О. В. Быстрое параметрическое дискретное преобразование Фурье действительных последовательностей / о. В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов. – 2012. – № 2. – С. 2–5.

УДК 339.545

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ГРАНИТА ПРИ ДОБЫЧЕ И ОБРАБОТКЕ

И. В. ПАВЛОВ

ФГБОУ ВПО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ
УНИВЕРСИТЕТ «ГОРНЫЙ»
Санкт-Петербург, Россия

До недавнего времени в России гранит в основном перерабатывался на щебень для устройства железнодорожного полотна и автомобильных дорог. Добыча производилась варварским способом – с помощью взрывчатки и соответственно вопрос о дефектоскопии не стоял. В последние годы резко увеличилась добыча гранитных блоков, предназначенных для производства облицовочных, архитектурно-строительных, мемориальных и других изделий [1]. Большое количество гранитных карьеров расположено в Северо-Западном регионе России (Карельский перешеек и Карелия). Достаточно отметить, что только ООО «Управляющая Компания Горное Управление ПО «Возрождение» (Выборг), добывает в год более 60 000 м³ блоков из природного камня, на месторождениях – «Возрождение», «Балтийское», «Нигрозеро», «Сопка Бунтина» из различных горных пород [2]. Блоки поставляются в разные регионы России и на экспорт (Украина, Беларусь, Китай, Польша, Италия, Германия и т.д.) При экспортных поставках к качеству горных пород предъявляются особо высокие требования. Основным дефектом, выявляемым часто после распиловки блоков, является трещиноватость (fissuring), которая в большей или в меньшей степени присутствует в них практически всегда на субмикроскопическом (разрыв различных типов атомных или межмолекулярных связей), микроскопическом (разрыв связей внутри или между отдельными кристаллами и зёрнами), макроскопическом (трещины видны невооружённым глазом) и мегаскопическом (крупные механические дефекты часто геологической природы, имеющие размеры сравнимые с размером рассматриваемого блока) [3]. Трещины субмикроскопического и мегаскопического уровня не рассматриваются.

В массиве горной породы гранит может находиться, кроме того, в сложнапряжённом состоянии, под большим давлением порядка 100...1000 МПа. В процессе добычи это напряжение в значительной степени снимается и перераспределяется. В. Гукер и В. Дювал в работе [3] приводят такие цифры: измеренная ими скорость УЗК в горном массиве составила 5385 м/сек, в добытом блоке она не превысила 3900 м/сек. При приложении к данному образцу одноосного сжимающего напряжения той же величины, что и в естественном состоянии, скорость не превысила

4500 м/сек. Это объясняется возросшей трещиноватостью гранита и снятием внутренних напряжений в процессе отделения блока от монолита.

Разделение монолитной горной породы на блоки вызывает возмущение их напряженно-деформированного состояния.

Поэтому для прогнозирования внутренней трещиноватости и разрушающей нагрузки гранитов в блоках было предложено применить ультразвуковой метод, а для обнаружения трещин, выходящих на поверхность и не выявляемых визуальным контролем – капиллярный метод.

Первоначально для установления связи скорости УЗК с разрушающей нагрузкой были изготовлены отдельные образцы, которые подвергались разрушающим испытаниям в соответствии с требованиями [4]. Была выявлена положительная корреляция скорости УЗК с величиной приложенной разрушающей нагрузки, однако вычисленный коэффициент корреляции не позволил рекомендовать разработанную методику для практического применения. Исследования внешнего вида образцов после разрушающих испытаний позволило предположить, что их разрушение часто происходит не из-за достижения предела прочности, а от раскалывания по естественной слоистости или по направлениям прорастания под нагрузкой магистральных трещин задолго до момента разрушения.

Дальнейшие теоретические исследования показали, что при одноосном нагружении (сжатии) в трещиноватой горной породе (с трещинами, расположенными в трёх плоскостях) одновременно протекают как минимум два процесса, либо взаимно исключающих друг друга, либо дополняющих друг друга - уплотнение и разуплотнение (микро разрушение), в зависимости от интервалов напряжений, в которых они рассматриваются. И если, например, на начальной стадии нагружения разуплотнение превалирует над уплотнением, то на стадии предшествующей разрушению, эти два процесса взаимно уравниваются, после чего уже уплотнение превалирует над разуплотнением [5]. Это позволяет предположить, что разрушающие испытания на одноосное сжатие, рекомендуемые [4], не учитывающие это явление, как и естественную слоистость материала, являются недостаточно информативными и могут быть рекомендованы применять их в совокупности с ультразвуковыми испытаниями.

Для проверки этой гипотезы было изготовлено более 600 кубических образцов гранита из 4-х различных месторождений северо-запада России, на которых производилась отработка комплексной методики неразрушающего контроля гранитных блоков, включающей ультразвуковой, импульсный и низкочастотный резонансный акустические методы контроля, весовой метод и разрушающий метод одноосного сжатия.

В результате для образцов гранита из четырёх месторождений («Нигрозеро», «Сопка Бундина», «Балтийское» и «Возрождение») были получены корреляционные зависимости между частотой собственных колебаний образцов, скоростью ультразвука частотой 100 кГц в них и наличием в

Второй недостаток алгоритма Герцеля более существенен. Дело в том, что фильтр Герцеля находится на грани устойчивости, так как его полюс расположен на единичной окружности z -плоскости. Если за счет округления коэффициентов фильтра полюс выйдет за пределы единичной окружности, фильтр Герцеля теряет устойчивость. Известный метод борьбы с указанным недостатком – обработка сигналов блоками длительностью в N отсчетов и обнуление внутренних регистров вначале обработки каждого нового блока данных [4]. Таким образом, устойчивость алгоритма Герцеля обеспечивается сокращением обрабатываемой длительности входного сигнала до N отсчетов.

Сделаем два замечания по поводу предложенной в [4] модификации фильтра Герцеля. Во-первых, такую же модификацию можно сделать и в преобразовании (1). Если целочисленную переменную k представить как переменную вида $(k + \theta)$, где $k = 0, N-1$, $0 \leq \theta < 1$, то приходим к введенному в [5] параметрическому ДПФ (ДПФ-П):

$$S_N(k, \theta) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{(k+\theta)n}, W_N^{(k+\theta)n} = \exp(-j \frac{2\pi}{N} (k + \theta)n) \text{ где } 0 \leq \theta < 1. \quad (2)$$

Можно показать, что при переходе к нецелому значению частоты вида $(k + \theta)$ происходит «набег» фазы и значение выходного отсчета модифицированного таким образом алгоритма Герцеля не будет совпадать с соответствующим коэффициентом ДПФ-П (тем более с коэффициентом ДПФ).

Допустим необходимо вычислить коэффициенты ДПФ от последовательности $x(n)$, длительностью в $n = 0, s \cdot N - 1$ отсчетов.

$$S_{s \cdot N}(s \cdot k, s \cdot \theta) = \sum_{n=0}^{s \cdot N - 1} x(n) W_{s \cdot N}^{(k+\theta)n}. \quad (3)$$

Так как ДЭФ-П обладают свойством, получившим название [5], «свойства *параметрической периодичности* ДЭФ-П по переменной n »:

$$\text{def}(k, n \pm rN, \theta) = \text{def}(k, n, \theta) W_N^{\pm \theta N r}, \quad r = 0, 1, 2, \dots$$

то сумму (3) можно представить в виде s сумм:

$$S_{s \cdot N}(s \cdot k, s \cdot \theta) = \exp(-j 2\pi \theta) \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{(k+\theta)n} + [\exp(-j 2\pi \theta)]^2 \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x(n + N) W_N^{(k+\theta)n} + \dots + [\exp(-j 2\pi \theta)]^s \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x(n + (s-1) \cdot N) W_N^{(k+\theta)n}. \quad (4)$$

Исходя из выражения (4) цифровую блочную обработку с накоплением (ЦБОН) для ДПФ-П можно представить в виде выполнения следующих этапов.

Приведем пошагово процедуру ЦБОН для ДПФ-П.

1. Разбиваем исходный сигнал на s блоков по N отсчетов в каждом:

2. Блок 1 $\Rightarrow [x(0), \dots, x(N-1)]$, Блок 2 $\Rightarrow [x(N), \dots, x(2N-1)]$, ...,

Блок $s \Rightarrow [x((s-1)N), \dots, x(s \cdot N-1)]$.

УДК 621.372.542
 МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ СКРЫТЫХ ПЕРИОДИЧНОСТЕЙ
 В ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛАХ НА ОСНОВЕ
 ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ДИСКРЕТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

О. В. ПОНОМАРЕВА
 ФГБОУ ВПО «ИЖЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
 УНИВЕРСИТЕТ им. М. Т. Калашникова»
 Ижевск, Россия

С необходимостью решения так называемой задачи выявления скрытых периодичностей [1, 2] приходится сталкиваться в различных предметных областях. Например, при виброакустическом функциональном диагностировании объектов широко применяется цифровой анализ виброакустических сигналов, структура которых характеризуется наличием гармонических рядов [3]. Для эффективного решения задачи выявления скрытых периодичностей, как методами цифровой фильтрации, так и методами спектрального анализа важно обеспечить: высокую разрешающую способность цифровой обработки; устойчивость выбранной дискретной системы фильтрации; полный контроль над резонансной частотой выбранной дискретной системы фильтрации; минимум времени цифровой обработки и объема необходимой памяти для ее осуществления.

Целью настоящей работы является разработка метода и алгоритма, обеспечивающих выполнение указанных выше требований к спектральному анализу.

Широко известный алгоритм Герцеля является одним из эффективных методов выявления скрытых периодичностей. Данный алгоритм позволяет с минимальными вычислительными затратами находить значения k -го бина N -точечного ДПФ [2, 4]:

$$S_N(k) = \sum_{n=0}^{(N-1)} x(n) \cdot W_N^{kn}, \quad W_N^{kn} = \exp(-j \frac{2\pi}{N} kn). \quad (1)$$

Однако, алгоритм Герцеля, обладает недостатками, которые не позволяют обеспечить выполнение поставленных выше задач. Прежде всего, это фиксированность набора анализируемых частот фильтром Герцеля:

$$\{2\pi k/N\},$$

где $k = \overline{0, N-1}$; N - число отсчетов сигнала.

Для устранения этого недостатка в [4] предложена модификация алгоритма Герцеля путем замены целочисленных значений переменной k в фильтре Герцеля на любое значение переменной k в диапазоне $\overline{0, N-1}$, обеспечивая, таким образом, полный контроль над резонансной частотой фильтра. Такая модификация действительно возможна, но важно понимать, что измеряет модифицированный таким образом фильтр Герцеля?

образцах трещин и плоскостей ослабления, на основании которых были полученные корреляционные уравнения, приведённые в табл. 1.

Табл. 1. Корреляционные зависимости для различных пород

Порода	Корреляционная зависимость	Коэффициент корреляции	Погрешность аппроксимации
Нигрозера вдоль слоев	$V=1164,43027+29,16658 \cdot R-0,06745 \cdot R^2$	0,935	$\pm 91,88977$
Нигрозера поперек слоев	$V=19431,57496+912,79247 \cdot R-12,43507 \cdot R^2+0,05736 \cdot R^3$	0,795	$\pm 133,95945$
Сопка Бунтина вдоль слоев	$V=4356,00502+14,13276 \cdot (R-0,03629)^2$	0,904	$\pm 44,70022$
Сопка Бунтина поперек слоев	$V=4696,82498+6,22226 \cdot R+0,05871 \cdot R^2$	0,797	$\pm 75,17897$
Возрождение	$V=4235,09068-6,07010 \cdot R+0,03930 \cdot R^2$	0,936	$\pm 21,24721$
Балтийское	$V=5340,39705-17,00147 \cdot R+0,10145 \cdot R^2$	0,940	$\pm 22,88424$

Это позволило дать рекомендации по отбору гранитных блоков для транспортировки заказчику в Китай и Польшу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 9479-2011.** Межгосударственный стандарт. Блоки из горных пород для производства облицовочных, архитектурно-строительных, мемориальных и других изделий. – М. : Стандартинформ. Изд-во стандартов, – 2012. – 8 с.
2. www.newvozt.ru
3. Разрушение / Под ред. Г. Либовица. – М. : Изд-во Мир, 1976. – Т. 7. – Ч. 1. Неорганические материалы. – С. 62–65.
4. **ГОСТ 21153.2-84.** Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. – М. : ИПК. Изд-во стандартов, 2001. – 8 с.
5. **Зиновьев, В. Н.** Определение микротрещинообразования бетона при сжатии ультразвуковым импульсным методом / В. Н. Зиновьев // Инновации в науке и образовании – 2009: тр. VII Междунар. науч. конф., Калининград, 20–22 окт. 2009 г. – Калининград, 2009. – Ч. 2. – С. 70–76.

УДК 620.179.14
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ МАГНИТНОГО МЕТОДА
КОНТРОЛЯ С ВИЗУАЛИЗАЦИЕЙ ПОЛЕЙ ДЕФЕКТОВ НА ПЛЕНКЕ

А. В. ШИЛОВ, В. А. НОВИКОВ, А. В. КУШНЕР, *А. А. СКРЕБУНОВ,
*М. С. КОВАЛЕНКО

ГУ ВПО «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ»
Могилев, Беларусь

Сотрудниками Белорусско-Российского университета в присутствии инженеров-технологов лаборатории неразрушающего контроля ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» были проведены испытания разработанных в университете технических средств и методики неразрушающего контроля ферромагнитных объектов с использованием пленки, визуализирующей магнитные поля. Объектом контроля являлась стальная литая заготовка опоры рамы БелАЗ 75310. Материал заготовки – сталь 15НМФЛ. Для проведения дефектоскопии были использованы: намагничивающее устройство, питаемое от источника постоянного тока IRPS 60 В/20 А; консольная тележка с балансиром для крепления намагничивающего устройства; пленка, визуализирующая магнитные поля; устройство для размагничивания пленки; приспособление для прижатия пленки к поверхности изделия; шаблон для разметки зоны контроля на участки.

Предварительно режим намагничивания был настроен на испытательном образце из материала контролируемого изделия, имевшего толщину 31 мм с искусственными цилиндрическими дефектами диаметром 4 мм, выполненными на различной глубине, и компактными глубиной 20 % от толщины стенки отливки.

Контроль заготовка опоры рамы БелАЗ 75310 производили без зачистки поверхности объекта. По результатам испытаний в двух областях объекта контроля были обнаружены индикаторные рисунки скопления пяти компактных внутренних дефектов (рис. 1, а) и протяженного извилистого индикаторного рисунка (рис. 1, б).

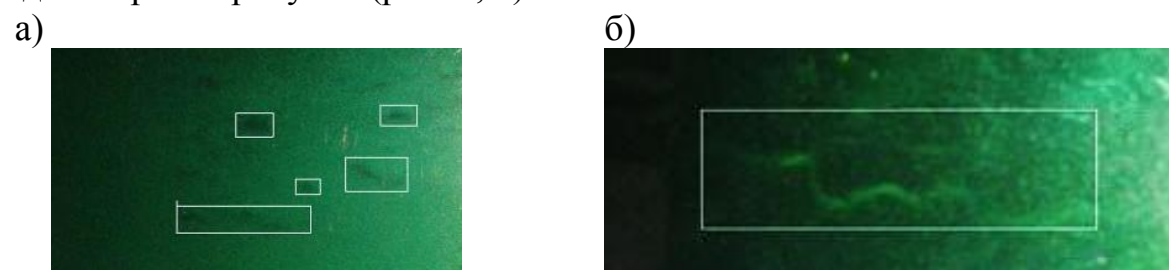


Рис. 1. Индикаторные рисунки дефектов в стальной отливке: а – скопления внутренних компактных несплошностей; б – внутренней трещины

Исходя из структуры матрицы $B_{r, \vec{a} \vec{e}}$, можно предложить следующий эффективный метод и алгоритм спектрального анализа узкополосных сигналов с высоким разрешением по частоте:

– разбиваем множество номеров отсчетов входного сигнала $x(n)$ $0, N \cdot r - 1$, на r классов вычетов по модулю r :

$$m_0 = \{x(0), x(r), \dots, x(r(M-1))\},$$
$$\dots \dots \dots ;$$
$$m_{r-1} = \{x(r-1), x(r+(r-1)), \dots, x(r(M-1)+(r-1))\}$$

– находим преобразования полученных последовательностей;
– проводим сложение полученных результатов преобразований.

Можно показать, что процентное уменьшение числа вычислений по сравнению со стандартным $N \cdot r$ – точечным БПФ определяется соотношением:

$$Q = 100 \cdot [1 - \frac{\log_2(N)}{\log_2(N \cdot r)}]. \quad (5)$$

Отметим еще одно преимущество данного метода и алгоритма спектрального анализа узкополосных сигналов с высоким разрешением по частоте по сравнению с методом предложенном в [4]. Когда нашли преобразования из сформированных последовательностей, то можно найти обычным сложением не только первые N коэффициентов ДПФ, но и другие $(r-1) N$ коэффициентов ДПФ или их комбинацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Серебренников, М. Г.** Выявление скрытых периодичностей / М. Г. Серебренников, А. А. Первозванский. – М. : Наука, 1965. – 244 с.
2. **Оппенгейм, Э.** Применение цифровой обработки сигналов / Э. Оппенгейм. – М. : Мир, 1980. – 552 с.
3. Неразрушающий контроль: справочник в 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2007. – Т. 7. – 829 с.
4. **Лайонс, Р.** Цифровая обработка сигналов: пер. с англ. / Р. Лайонс. – 2-е изд. – М. : ООО «Бином-Пресс», 2007. – 656 с.
5. **Пономарев, В. А.** Теория и применение параметрического дискретного преобразования Фурье / В. А. Пономарев, О. В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов. – 2011. – № 1. – С. 2–6.
6. **Пономарева, О. В.** Скользящее параметрическое ДПФ в задачах обнаружения тональных компонент / О. В. Пономарева, А. В. Пономарев, Н. В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов. – 2012. – № 4. – С. 2–7.

$$\{def(k, n)\} = F_M = F_{N \cdot r} = \begin{matrix} & 0 & 1 & . & . & . & (M-1) \\ 0 & \left[\begin{array}{cccccc} 1 & 1 & . & . & . & 1 \\ 1 & W_M^1 & . & . & . & W_M^{(M-1)} \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ (M-1)_k & 1 & W_M^{(M-1)} & . & . & W_M^{(M-1)(M-1)} \end{array} \right]^n, \end{matrix} \quad (1)$$

где $W_M = \exp(-j \frac{2\pi}{M})$, $M = Nr$, $r = 1, 2, 3, \dots$

Обозначим множество номеров строк матрицы F_{Nr} через E :

$$E = \{0, 1, 2, \dots, Nr - 1\}.$$

Применив к множеству номеров столбцов E матрицы F_{Nr} отношение сравнимости по модулю r . В силу того, что это отношение является отношением эквивалентности, т. е. обладает свойствами рефлексивности, симметричности, транзитивности, оно разбивает множество E на r классов вычетов по модулю r :

$$E_0 = \{0, r, \dots, r(M-1)\}, \quad (2)$$

$$E_{r-1} = \{r-1, r+(r-1), \dots, r(M-1)+(r-1)\},$$

$$E_i \neq \emptyset; E_i \bigcap_{i \neq j} E_j = \emptyset; \bigcup_{i=0}^{r-1} E_i = E.$$

Используя полученное разбиение, переупорядочим множество столбцов матрицы F_{Nr} и представим ее в виде блочной матрицы [6]:

$$B_{r,\delta,l.} = \begin{matrix} & 0 & 1 & . & . & . & (r-1) \\ 0 & B_{11} & B_{12} & . & . & . & B_{1r} \\ 1 & B_{11} & W_r^1 B_{12} & . & . & . & W_r^{(r-1)} B_{12} \\ . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . \\ (r-1)_k & B_{11} & W_r^{(r-1)} B_{12} & . & . & . & W_r^{(r-1)(r-1)} B_{1r} \end{matrix} \Bigg]^n, \quad (3)$$

где $B_{ij} = B_{1,i} \otimes C_j$, $\otimes$ – символ кронекеровского произведения.

$$G_i = [1, W_r^{(j-1)}, \dots, W_r^{(j-1)(r-1)}], i = 1, 2, \dots, r; j = 1, 2, \dots, r. \quad (4)$$

Матрицы B_{ij} , образующие первую строку блочной матрицы $B_{r, \text{бл.}}$ (3), при $\theta = (i-1)/r$ задают разложение параметрическое ДПФ (ДПФ-П) по базисным функциям вида [6]:

Для подтверждения наличия дефектов в областях, соответствующих обнаруженным индикаторным рисункам, работниками предприятия были вырезаны образцы и вскрыты путем фрезерования с шагом 2 мм. В первом образце, на глубине 20 мм от поверхности, были обнаружены 5 шлаковых включений (рис. 2), из которых 3 оказались недопустимыми (размерами 10×4 мм, 5×7 мм, 5×2 мм).



Рис. 2. Шлаковые включения в стальной отливке после вскрытия

Во втором образце на глубине 6 мм (в месте, соответствующем извилистому индикаторному рисунку дефекта на пленке) была обнаружена внутренняя трещина (рис. 3).

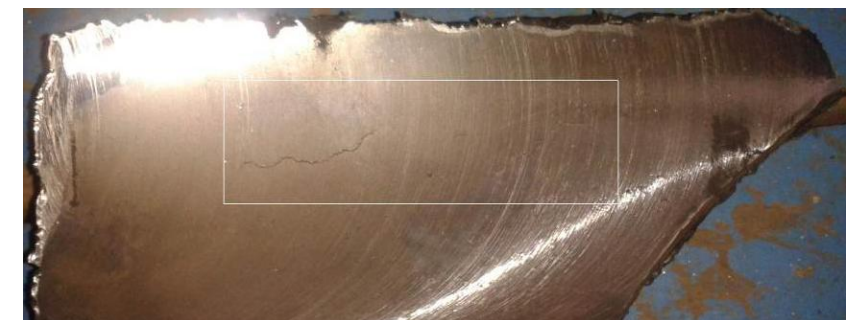


Рис. 3. Обнаруженная в образце внутренняя трещина на глубине 6 мм

Испытания показали, что применение разработанных технических средств и методик 4 и позволяют выявлять в стальных отливках толщиной до 30 мм без предварительной зачистки поверхности зоны контроля внутренние протяженные дефекты глубиной не менее 4 мм и компактные дефекты глубиной не менее 20 % от толщины стенки отливки во всей толщине металла. Они дают возможность одновременно осуществлять контроль больших площадей объектов (160x170 мм) при многократном (несколько тысяч раз) использовании визуализирующей магнитные поля пленки.

В. А. БАННЫЙ
УО «ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
Гомель, Беларусь

Оценка содержания воды в твердых телах имеет важное практическое значение. В петрофизике количественное содержание воды в образцах керна дает информацию об эффективной пористости и емкости пустот. Не существует абсолютно сплошных и непроницаемых пород. Вода, наряду с другими подвижными компонентами (углеводородные флюиды, газы), проникает в горные породы благодаря наличию в них всевозможных трещин, пустот, каналов и т.п. Следует отметить, что вода может находиться в связанной и свободной формах. Свободная вода перемещается по системе каналов и трещин горной породы под действием силы тяжести или напора и обладает обычными для воды физическими свойствами. Связанная вода находится и удерживается в мелких порах и трещинах и испытывает со стороны поверхности твердой фазы минералов «связывающее» влияние различной природы и интенсивности, изменяющие ее структуру и придающие ей аномальные свойства [1].

Свойства горных пород варьируются в зависимости от наличия в них связанной воды. Метастабильность воды позволяет ей откликаться на внешнее воздействие любой природы [2]. Существует ряд способов количественного определения содержания воды в твердых телах, основанных на различных физических воздействиях на исследуемые образцы. В петрофизике, при оценке остаточной водонасыщенности, классическим считается метод сушки образцов керна с последующим определением их массы и центрифугированием; интенсивно развиваются электронный и протонный магнитные резонансные методы [3]; также структуру молекул и кластеров водных систем определяет вид ИК-спектра [4]. Спектр поглощения воды ИК-области представлен основными полосами валентных колебаний ($\sim 3000\text{--}3600\text{ см}^{-1}$), обусловленных изменениями длин связей в молекуле воды, деформационных колебаний (узкая полоса вблизи $\sim 1650\text{ см}^{-1}$, соответствующая изменениям углов валентных связей) и суммой деформационных и либрационных колебаний молекул ($\sim 2130\text{--}2150\text{ см}^{-1}$), либрационные колебания ($\sim 700\text{ см}^{-1}$).

Перспективным направлением в решении задачи определения связанной воды в твердых телах является радиочастотный способ, основанный на взаимодействии электромагнитного излучения (ЭМИ) СВЧ-диапазона с

Н. В. ПОНОМАРЕВА
ФГБОУ ВПО «ИЖЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. М. Т. Калашникова»
Ижевск, Россия

В современных методах контроля качества и диагностики состояния объектов часто приходится сталкиваться с цифровой обработкой случайных сигналов, содержащих «скрытые» гармонические (тональные) компоненты (решение так называемой задачи выявления скрытых периодичностей [1, 2]). Например, в машиностроении при виброакустическом функциональном диагностировании объектов широкое распространение получил анализ виброакустических сигналов, структура которых характеризуется наличием гармонических рядов, порождаемых теми или иными дефектами при функционировании различных узлов и механизмов [3].

Отметим, что при спектральном анализе такого рода сигналов нас интересует только тот частотный диапазон, где наблюдается проявление гармоник, связанных с теми или иными дефектами диагностируемого объекта. Естественно, для надежного выделения информативных классификационных признаков спектральный анализ для обнаружения и выделения параметров скрытых периодичностей должен проводиться с высоким разрешением по частоте. В настоящее время известны два метода спектрального анализа таких сигналов. Первый из них решение задачи «в лоб»: выполнение ДПФ с помощью БПФ и с последующим «отбросом» не интересующих нас коэффициентов (бинов) ДПФ. В связи с явной неэффективностью данного подхода Р. Лайонсом в [4] предложен метод, названный им «увеличение масштаба БПФ по частоте» или «растянутое БПФ». Не останавливаясь подробно на «подводных камнях» этого метода [4], отметим только существенную структурную сложность метода.

Целью настоящей работы является разработка метода спектрального анализа узкополосных сигналов с высоким разрешением по частоте, свободного от указанных выше недостатков метода увеличения масштаба БПФ по частоте.

Предлагаемый метод основан на анализе аналитических свойств матрицы преобразования ДПФ, представляющей собой систему дискретных экспоненциальных функций (ДЭФ) [5]:

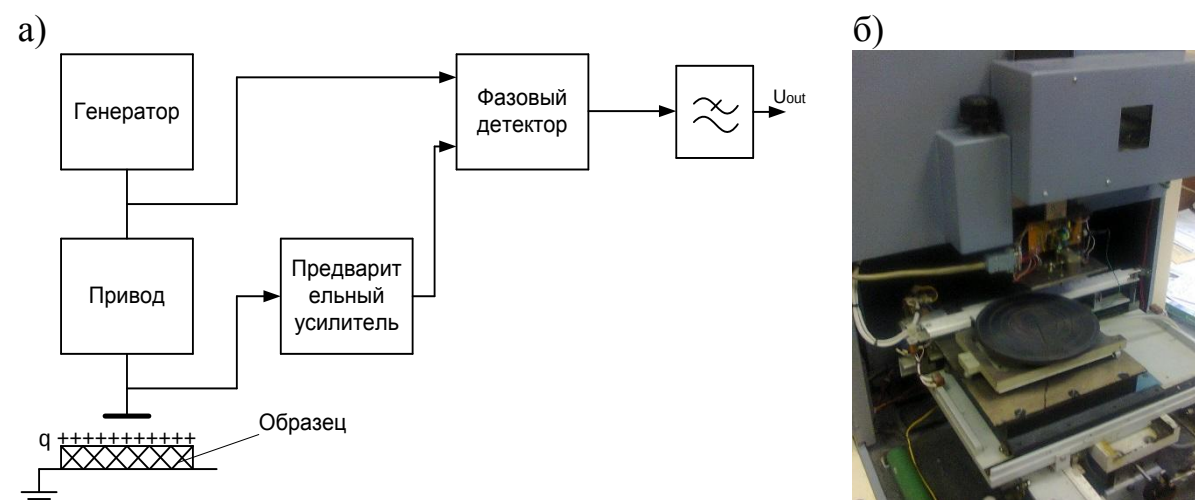


Рис. 2. Структурная схема (а) и общий вид (б) установки для исследования распределения пространственного поверхностного заряда

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Точные пластмассовые детали и технология их получения / В. Е. Старжинский [и др.] ; под общ. ред. В. А. Старжинского. – Минск : Наука и техника, 1992. – 352 с.
2. Триботехнические свойства нанокompозитов, получаемых диспергированием наполнителей в расплавах полимеров / С. С. Песецкий [и др.] // Трение и износ. – 2007. – № 5. – С. 500–521.
3. Исследование накопления заряда статического электричества на поверхности изделий из фторопласта-4 методом вибрирующего конденсатора / Г. А. Вершина [и др.] // Наука и техника. – 2012. – № 1. – С. 26–32.
4. Трение полимеров / В. А. Белый [и др.] ; под общ. ред. Д. Н. Гаркунова. – М. : Наука, 1972. – С. 31–39
5. Особенности проведения триботехнических испытаний композитов на основе ПТФЭ / А. В. Купреев [и др.] // «ПОЛИКОМТРИБ-2013»: тез. докл. VIII Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 24–27 июня, 2013 г. / ИММС НАН Беларуси; редкол. В. Н. Адериha [и др.]. – Гомель, 2013. – С. 175.
6. Surplice, N. A. A critique of the Kelvin method of measuring work functions / N. A. Surplice // J. of Physics E-Scientific Instruments. – 1970. – № 3. – P. 477.

E-mail: nilpt@tut.by

тестируемыми образцами. Техничко-методическое обоснование возможности оценки связанной воды в цилиндрических образцах керна методами СВЧ приведены в работе [3]. Прототипом данной разработки является радиочастотный способ влагометрии неводных жидкостей [5–8].

Цель работы – усовершенствование радиочастотного способа оценки водонасыщенности твердых тел; установление и объяснение зависимостей между ослаблением энергии ЭМИ СВЧ-диапазона, проходящего через исследуемые образцы горной породы и количественным содержанием в них воды.

Объектами исследования служили образцы горной породы с различными значениями коэффициента эффективной пористости и емкости пустот, а, следовательно, с различным содержанием воды. Для определения количества воды в образцах использовали измеритель коэффициента стоячей волны и ослабления Р2-61, собранный по схеме измерения ослабления с рабочей частотой от 8 до 12 ГГц и удельной мощностью генератора 10 мВт/см².

Идея состоит в том, чтобы в качестве основного регистрируемого параметра использовать ослабление энергии ЭМИ при его прохождении через водосодержащий образец горной породы. Радиочастотный способ оценки водонасыщенности твердых тел основан на различии диэлектрических свойств скелета породы и воды (водных растворов).

Способность исследуемого объекта поглощать ЭМИ зависит от его электрических и магнитных свойств. Наиболее информативными характеристиками реакции среды на воздействие внешнего электромагнитного поля, являются частотные дисперсии комплексных величин диэлектрической и магнитной проницаемостей, а также тангенсов углов диэлектрических и магнитных потерь. Вода является диэлектриком и, соответственно, диэлектрические потери наиболее выражены при взаимодействии ЭМИ с водой. Диэлектрические потери обусловлены инерционностью поляризации компонентов вещества. Они имеют релаксационную природу. Наличие разностей фаз (δ и δ_m) приводит к диэлектрическим ($tg\delta$) потерям и, в итоге, к поглощению энергии ЭМИ [9].

Диэлектрические потери возрастают с увеличением концентрации в веществе компонентов с высокой диэлектрической проницаемостью (ϵ), в частности, воды и водных растворов солей. Растворы электролитов, по сравнению с чистой водой, характеризуются повышенными значениями вязкости, диэлектрической проницаемости, электропроводности. Диэлектрическая проницаемость полярных жидкостей, подверженных ориентационной поляризации, сравнительно велика. Так, для воды $\epsilon = 81$ при частоте электромагнитных волн $\nu = 50$ Гц; $\epsilon = 65$ при $\nu = 10$ ГГц. [10], а диэлектрическая проницаемость скелета породы находится в диапазоне 3–6 [3]. Минерализация воды инициирует появление ионов проводимости и дополни-

тельно «запускает» другой механизм потерь энергии ЭМИ – на электропроводность за счет возникновения вихревых токов в электролите.

Основной характеристикой взаимодействия ЭМИ с водосодержащими объектами является величина ослабления электромагнитной энергии, зависящая от количества и свойств поглощающего наполнителя, в частности воды или водных растворов. Сравнивая величины ослабления ЭМИ разными образцами, можно анализировать их водосодержание.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Королев, В. А.** Связанная вода в горных породах: новые факты и проблемы / В. А. Королев // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 9. – С. 79–85.
2. **Классен, В. И.** Омагничивание водных систем / В. И. Классен. – М. : Химия, 1973. – 239 с.
3. **Табарин, В. А.** Определение содержания связанной воды в кернах на СВЧ / В. А. Табарин, С. Д. Демьянцева // Нефтегазовое дело. – 2009. – № 1. – С. 1–28.
4. Структура и свойства воды, облученной СВЧ-излучением / В. Ф. Мышкин [и др.] // Научный журнал КубГАУ. – 2012. – № 81. – С. 1–12.
5. **Пат. 10139 Респ. Беларусь, МПК⁸ G 01 N 22/00.** Способ радиочастотной влагометрии нефтепродуктов и устройство для его осуществления / В. А. Банный, Пинчук Л. С.; заявитель и патентообладатель ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси». – а20050431 ; заявл. 02.05.05 ; опубл. 28.02.07 // Афіцыйны бюлетэнь / Нац. Цэнтр інтэлектуал. Уласнасці. – 2007. – № 3.
6. **Пат. 14865 Респ. Беларусь, МПК⁸ G 01 22/04.** Устройство для радиочастотной влагометрии нефтепродуктов / Л. С. Пинчук, В. А. Гольдаде, В. А. Банный, О. Ч. Василевская, О. В. Холодилов; заявитель и патентообладатель ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси». – а20090988; заявл. 06.07.09; опубл. 28.02.11// Афіцыйны бюлетэнь / Нац. Цэнтр інтэлектуал. Уласнасці. – 2011. – № 2.
7. Радиочастотный способ влагометрии жидкостей / В. А. Банный [и др.] // Журнал прикладной химии. – 2002. – Т. 75, вып. 8. – С. 1389–1390.
8. **Василевская, О. Ч.** Способ радиочастотной влагометрии нефтепродуктов / О. Ч. Василевская, В. А. Банный, О. В. Холодилов // Вестн. БелГУТа. – 2009. – № 2. – С. 86–88.
9. **Банный, В. А.** Взаимодействие СВЧ-излучения с полимерным композитным электромагнитным экраном: физические модели и эксперимент / В. А. Банный, В. А. Гольдаде, Л. С. Пинчук // Материалы, технологии, инструменты. – 2008. – № 2. – С. 45–51.
10. **Грудинская, Г. П.** Распространение радиоволн / Г. П. Грудинская. – М. : Высш. шк., 1967. – 244 с.

E-mail: bannyi@tut.by

СМТ-1 позволяют провести испытания при скоростях 1...3 м/с и нагрузках 250...2000 Н. В качестве контртела были использованы ролики из стали 45 (ГОСТ 1050-88) твердостью HRC 32...36 и шероховатостью поверхности Ra = 0,32 мкм. Коэффициент взаимного перекрытия пары трения вкладыш – ролик составлял 0,125. Результаты триботехнических испытаний были представлены ранее в работе [5].

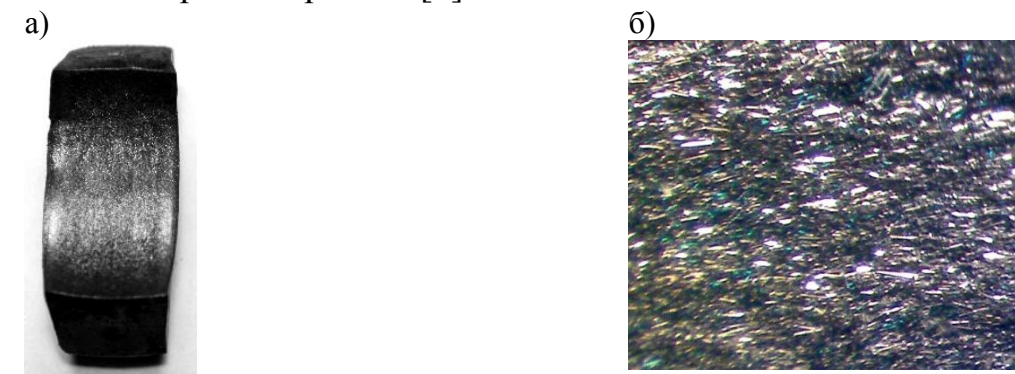


Рис. 1. Образец после испытаний на трение и износ (а) и его морфология при х5 увеличении (б)

Для исследования плотности пространственного потенциала на поверхности трения был использован метод динамического конденсатора [6], известный также как метод Кельвина-Зисмана. Структурная схема установки, реализующей данный метод измерения, и ее общий вид представлены на рис. 2, а, б соответственно. Основу установки составляет вибрирующий конденсатор, одной из обкладок которого является торцевая поверхность электрометрического зонда, а другой – заряженная поверхность образца. Динамический зонд вибрирует вдоль нормали к поверхности образца с частотой 300 Гц, чем достигается модуляция сигнала.

Результаты применения метода вибрирующего конденсатора к исследованию плотности статического заряда показали, что метод может быть использован при контроле электрических свойств композитов на основе политетрафторэтилена. Регистрируемое пространственное распределение заряда отражает распределение микронеоднородностей поверхности образцов, хотя и не копирует его. Наибольшая неравномерность распределения заряда наблюдается у центров. Данное может быть объяснено неравномерностью распределения нормального давления. Установление точной корреляции полученных значений электризуемости требует дополнительных исследований структурных и фазовых превращений непосредственно в процессе трения.

УДК 621.81
ДИАГНОСТИКА МОДИФИЦИРОВАННОЙ ТРЕНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ
КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПТФЭ ПО ПЛОТНОСТИ
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ПОТЕНЦИАЛА

К. В. ПАНТЕЛЕЕВ, А. Л. ЖАРИН, А. И. СВИСТУН
«БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Минск, Беларусь

Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена существенно изменяют фрикционное взаимодействие узлов трения. Благодаря этому они находят широкое применение при использовании в качестве антифрикционных материалов или в виде покрытий как аналог традиционным твердым смазкам в различных узлах трения [1].

Требуемые свойства современных антифрикционных материалов обеспечиваются введением в полимерную матрицу различных дисперсий. Особенно перспективным является наполнение углеродом всех возможных аллотропических модификаций [2], которое существенно увеличивает тепло- и электропроводность композита, его прочность и положительно сказывается на трибологических свойствах. Однако известно [3], что высокая склонность к электризации и способность долгое время удерживать накопленный поверхностный заряд оказывают сдерживающее влияние для использования материалов на основе политетрафторэтилена в узлах, чувствительных к статическому электричеству.

Несмотря на значительный объем экспериментальных данных, процессы поверхностной электризации при фрикционном взаимодействии композитов на основе политетрафторэтилена изучены недостаточно. При изучении фрикционного взаимодействия полимеров следует учитывать электронный механизм процессов, протекающих в области фактического контакта [4], который вследствие контактной электризации и электростатического притяжения зарядов двойного электрического поля, возникающего на границе двух фаз, способствует образованию химических и межмолекулярных связей между контактирующими телами.

Целью работы является анализ плотности распределения заряда статического электричества на механически нарушенном трением поверхностном слое композитов на основе политетрафторэтилена.

В качестве объектов для проведения исследований были использованы композиционные материалы на основе фторопласта-4, модифицированного углеродными волокнами, известные под марками Флувис (ТУ РБ 03535279.071-99) и Суперфлувис (ТУ ВУ 400084698.178-2006).

Поверхность трения (рис. 1) получали путем проведения триботехнических испытаний на машине трения 2070 СМТ-1 с использованием схемы «вал – частичный вкладыш». Технические характеристики машины трения

УДК 620.179.14
МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СИГНАЛОВ ОТ ПРОВОДЯЩИХ
ОТЛОЖЕНИЙ НА ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕННЫХ
ТРУБ ПРИ КОНТРОЛЕ ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ

П. А. БАРАБАНОВ, В. П. ЛУНИН, А. А. СТОЛЯРОВ
ФГБОУ ВПО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»
Москва, Россия

На настоящий момент доля электроэнергии, полученной на атомных электростанциях (АЭС) в России, составляет порядка 16 % от всей производимой электроэнергии. Атомная энергетика играет важную роль в обеспечении энергией потребителей и является одной из приоритетных областей развития энергетического комплекса.

Один из важнейших узлов ядерного реактора – парогенератор (ПГ). Теплообменные трубы ПГ являются границей между первым и вторым контурами атомных электростанций, и, в связи с этим, играют важную роль в их безопасной эксплуатации.

Среди требующих решения проблем, возникающих при проведении вихретокового неразрушающего контроля теплообменных труб (ТОТ), одной из наиболее актуальных остается проблема достоверного обнаружения и определения объема электропроводящих и/или магнитных отложений продуктов коррозии на внешней поверхности ТОТ. Отложения на внешней поверхности ТОТ оказывают негативное влияние на надежность и работоспособность ПГ. Во-первых, под скоплениями отложений образуется благоприятная среда для развития коррозии стенок ТОТ. Также, ввиду нарушений циркуляции теплоносителя, обусловленной скоплениями отложений, увеличиваются вибрационные нагрузки на трубный пучок, что способствует развитию и росту дефектов. В-третьих, наличие отложений является сильным мешающим фактором при контроле дефектов основного металла труб ПГ вихретоковым методом, их обнаружение и отстройка от их влияния на сигнал является одной из важнейших задач повышения качества контроля.

Основной целью представленной работы является анализ влияния проводящих и магнитных отложений на вихретоковый сигнал с целью создания автоматизированного алгоритма обнаружения и оценки объема отложений при проведении плановых работ по проверке состояния ТОТ.

Для решения поставленной задачи необходимо иметь определенный набор сигналов от отложений с различными геометрическими и физическими параметрами. Следовательно, прежде чем решать обратную задачу НК, необходимо получить решение прямой задачи и создать базу сигналов.

Прямая задача вихретокового контроля - получение сигналов от ВТП. Так как провести необходимое количество экспериментов не представляется возможным, было принято решение использовать для получения данных результаты моделирования процесса контроля методом конечных элементов [1, 2, 3]. В пакете *Comsol Multiphysics* была создана двумерная модель процесса контроля, позволившая получить базу модельных сигналов.

С целью анализа влияния геометрических и физических параметров отложений на сигнал, была составлена база данных, содержащая смоделированные сигналы от 1200 отложений с различными свойствами ($h = 2 \div 10$ мм, $w = 0,1 \div 5$ мм) на четырех рабочих частотах (25, 100, 200, 400 кГц). Так как отложения на разных АЭС имеют различные физические свойства, были смоделированы отложения, имеющие различную электрическую проводимость $\sigma = 0,1 \div 0,5$ МСм/м и магнитную проницаемость ($\mu = 1 \div 25$).

В анализируемых сигналах было выделено 23 информативных параметра (13 на дифференциальном канале и 10 на абсолютном), среди них: фаза, амплитуда, максимумы активной и реактивной составляющей, длина годографа, энергия сигнала и другие. Затем был проведен корреляционный анализ значений признаков и интересующих нас параметров с целью выявить степень их влияния на сигнал.

Результаты корреляционного анализа показали, что невозможно выделить какой-либо признак, по которому можно было бы однозначно определить те или иные параметры отложения. В подавляющем большинстве случаев, коэффициенты корреляции не превышают значения 0,6. К тому же, большинство информативных признаков, как правило, в равной степени коррелируют сразу с несколькими параметрами отложений, что сильно усложняет их интерпретацию.

В качестве поиска способа увеличения коэффициентов корреляции между признаками отложений и информативными параметрами сигнала был проведен эксперимент с применением аффинных преобразований, т. е. геометрических преобразований, сохраняющих пропорции фигур, в частности вращений и масштабирования. Некоторые из них, по сути, реализуют стандартные процедуры настройки и калибровки вихретоковых дефектоскопов (изменение фазы сигналов при калибровке по 100 % дефекту). В результате данных экспериментов стало известно, что простое вращение годографов относительно начала координат (варьирование фазы сигнала) никак не влияет на коррелированность параметров. Однако при исключении с помощью аффинных преобразований фазового (приравнивание фаз всех сигналов к одному значению) или амплитудного критериев (приравнивание всех амплитуд к одному значению) позволяют увеличить коэффициенты корреляции до значений 0,7–0,8, а, в отдельных случаях, даже до

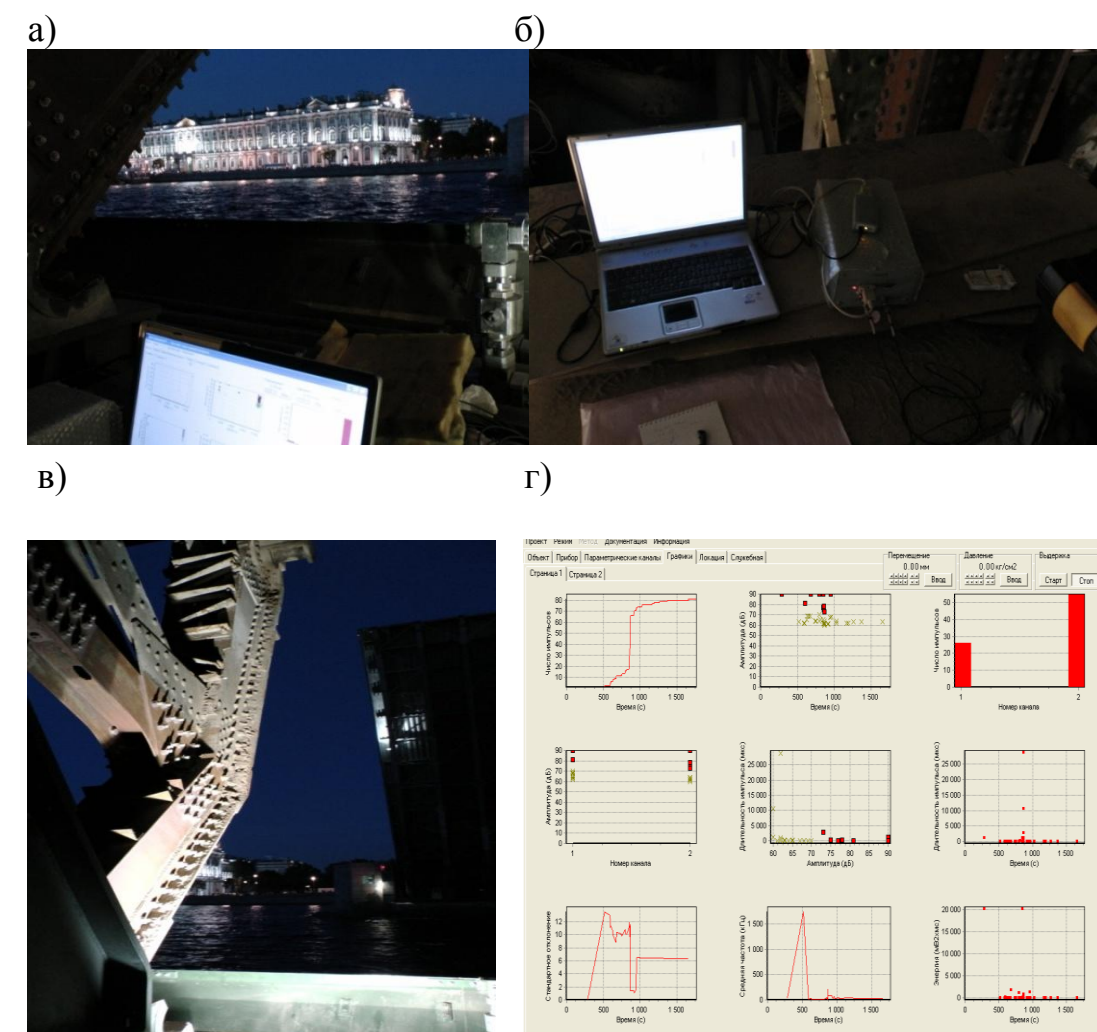


Рис. 3. Вид моста во время (а) и по окончании (в) испытаний, используемое оборудование АЭ (б) и результаты регистрации АЭ в графическом виде (г)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Носов, В. В.** Диагностика машин и оборудования : учеб. пособие / В. В. Носов. – 2-е изд. испр. и доп. – СПб. : Изд-во «Лань», 2012. – 384 с.
2. **Носов, В. В.** Оценка ресурса технических объектов на основе моделирования временной зависимости параметров акустической эмиссии / В. В. Носов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2013. – № 2. – С. 149–155.
3. **Носов, В. В.** Механика композиционных материалов. Лабораторные работы и практические занятия : учеб. пособие / В. В. Носов. – 2-е изд. перераб. и доп. – СПб. : Изд-во «Лань», 2013. – 240 с.

Микромеханическая модель параметров АЭ

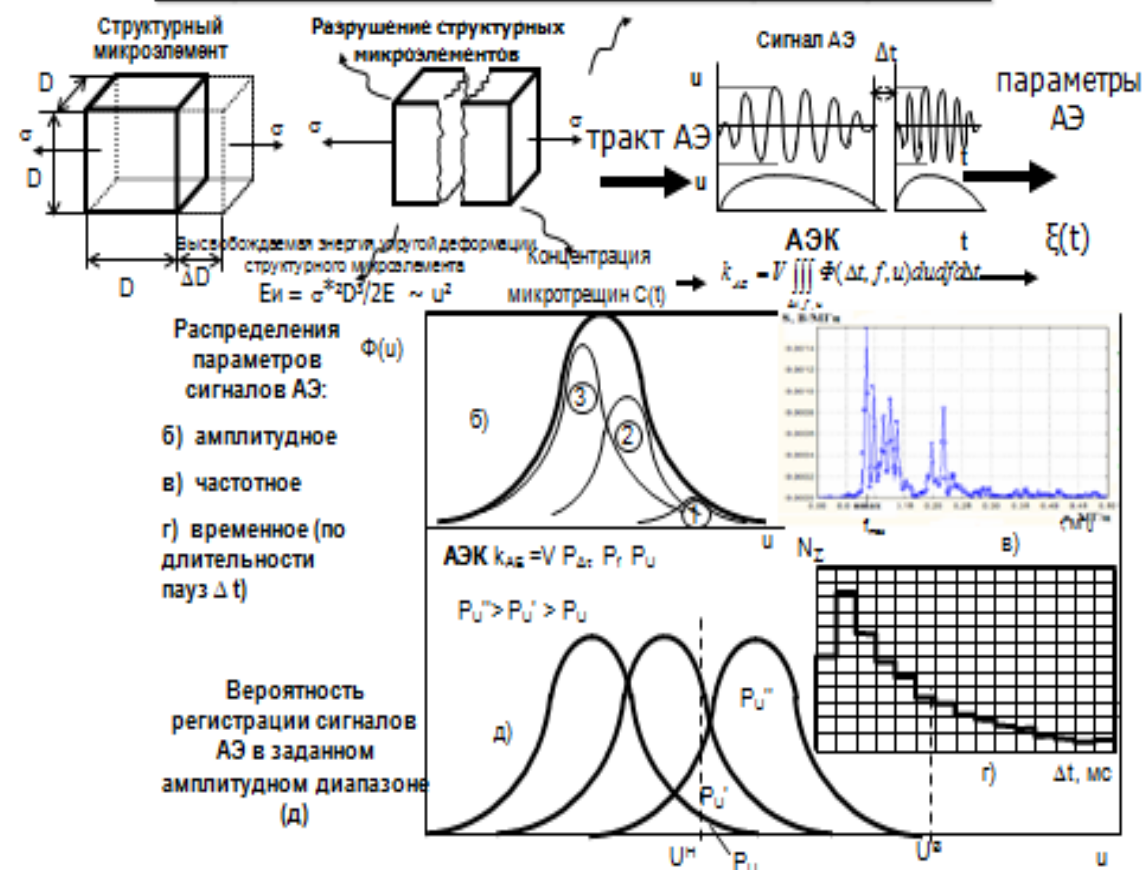


Рис. 2. Структура и вид микромеханической модели АЭ: 1,2,3 – распределения от разрушения структурных элементов граничной зоны адгезионных связей композита или материала сварного шва (1), волокна композита или околосшовной зоны, зоны нормализации и основного металла сварного соединения (2), матрицы композита или элементов разупрочненной зоны сварного соединения (3); P_u , P_u' , P_u'' – вероятности попадания амплитуды сигнала АЭ в регистрируемый амплитудный диапазон $[U^H; U^B]$ при равномерном, экспоненциальном (показательном) и с наличием максимума наблюдаемом амплитудном распределении сигналов АЭ соответственно; P_t , P_f – вероятности регистрации сигналов в заданном временном и частотном диапазоне соответственно

Для оценки состояния шарнира в условиях неопределённости фактических напряжений использован безразмерный диагностический параметр прочностного состояния:

$$W_{AE} = d \ln \xi / d K_n \approx \omega,$$

где $K_n = F_i / F_{раб}$ – коэффициент нагрузки, F_i , $F_{раб}$ – диагностическая и рабочая нагрузки.

0,9. К тому же, при такой отстройке появляются признаки коррелирующие только с одним параметром отложения, что потенциально существенно упрощает интерпретацию сигналов.

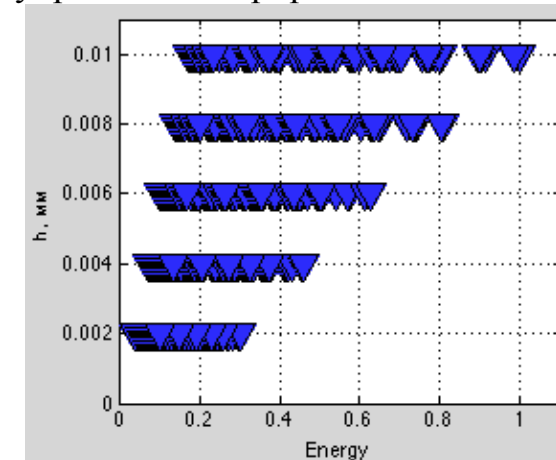


Рис. 1. Зависимость энергии сигнала от протяженности отложения до применения аффинных преобразований (абсолютный канал, $f = 200$ кГц)

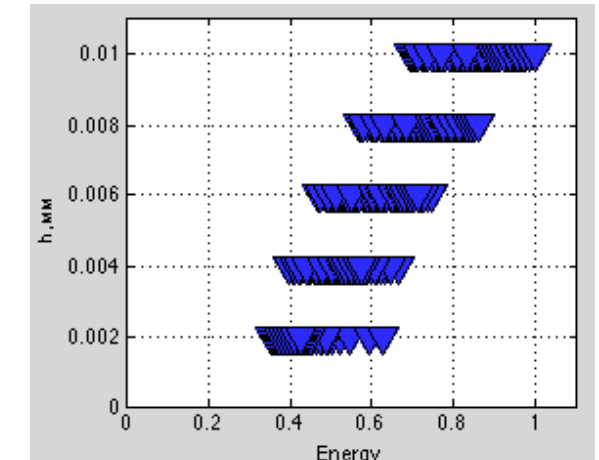


Рис. 2. Зависимость энергии сигнала от протяженности отложения после применения аффинных преобразований (абсолютный канал, $f = 200$ кГц)

На данном этапе можно однозначно сказать, что дифференциальный сигнал имеет несколько большую чувствительность к физическим свойствам отложений, в то время как абсолютный сигнал более чувствителен к геометрическим параметрам. Тем не менее, несмотря на улучшение коррелированности признаков сигналов и свойств отложений, говорить о применении простых линейных алгоритмов для интерпретации сигналов (построении калибровочных кривых) нельзя. Поэтому целью дальнейшей работы является более глубокое изучение полученных зависимостей, поиск новых информативных параметров, а также изучение возможности применения тех или иных методов цифровой обработки сигналов для решения поставленной задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов В. Г. Неразрушающий контроль : в 5 кн. Электромагнитный контроль : практ. пособие / В. Г. Герасимов, А. Д. Покровский, В. В. Сухоруков // М. : Высш. шк., 1992. – Кн. 3.
2. Луний, В. П. Метод конечных элементов в задачах прикладной электротехники / В. П. Луний. – М. : Изд-во МЭИ, 1996.
3. Jiang Z., El Guedri M., Haddar H., Lechleiter A. Eddy current tomography of deposits in steam generator. // 19th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2011), Barcelona, Spain, 2011

E-mail: barabanov.pa@gmail.com

УДК 681.518

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИНФРАКРАСНОЙ СЕЛЕКТИВНОЙ
ВЛАГОМЕТРИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ
МАКУЛАТУРНОГО СЫРЬЯ

В. Г. БЕЛКИН, Л. Н. ВАСИЛЕВИЧ, И. А. ТИТОВИЦКИЙ
НИУ «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНЫХ
ФИЗИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ им. А. Н. Севченко» БГУ
Минск, Беларусь

В настоящее время в целлюлозно-бумажной промышленности повсеместно и все более широко используется макулатура в качестве волокнистого сырья при производстве бумаги и картона. Это обусловлено, прежде всего тем, что использование макулатуры позволяет существенно сократить энергозатраты, снизить расход первичной целлюлозы, а значит, сохранить лесные ресурсы и способствовать охране окружающей среды. Также макулатура дешевле, чем свежие полуфабрикаты из древесины. Это снижает себестоимость и повышает конкурентоспособность продукции.

Сбором и поставкой макулатуры на предприятия целлюлозно-бумажного комплекса занимаются, как правило, коммерческие организации. Сырье рассортировывается по сортам в соответствии с ГОСТ 10700-97 [1] и поставляется на вес. Поставляемая макулатура может иметь различную влажность (по ГОСТ 10700-97 не более 15 %), но массу партии определяют исходя из влажности макулатуры 12 %. Для точного расчета веса поставляемой макулатуры и во избежание конфликтных ситуаций становится актуальной задача оперативного определения влажности поставляемого продукта.

Для решения поставленной задачи существуют различные методы и устройства. Основной, наиболее точный метод определения влажности, которым пользуются все лаборатории – термogrавиметрический. Но он имеет существенный недостаток – слишком много времени (часы) требуется на одно измерение. Поэтому, в последнее время, для оперативного контроля влажности стали применять приборы, основанные на различных методах измерения (кондуктометрический, диэлькометрический, емкостный, микроволновый и др.), но они не всегда обеспечивают необходимую достоверность результатов замеров.

Одним из наиболее перспективных является спектрометрический метод измерения влажности, обеспечивающий достаточную точность, чувствительность, воспроизводимость, непрерывный неразрушающий контроль, бесконтактность и экспрессность анализа [2]. В основе метода лежит известный факт, что в инфракрасном спектре электромагнитных волн существуют частотные полосы с максимальным поглощением молекулами воды, и полосы, где поглощение практически отсутствует.

УДК 620.179

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ШАРНИРОВ ПРОТИВОВЕСА ДВОРЦОВОГО
МОСТА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

В. В. НОСОВ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ГОРНЫЙ»
Санкт-Петербург, Россия

В связи с реконструкцией Дворцового моста через реку Неву (рис. 1, а), была поставлена задача оценки состояния шарниров предположительно наиболее нагруженных крайних опор обоих крыльев Дворцового моста (рис. 1 б, в), для чего были привлечены методики, основанные на использовании явления акустической эмиссии (АЭ) и микромеханической модели временных зависимостей её параметров (рис. 2) [1–4]. Необходимое для осуществления АЭ-диагностики нагружение шарниров осуществлялось посредством подъёма моста (рис. 3, а-в), в процессе чего нагрузка на шарнир увеличивалась в пределах 50-320 тонн и регистрировались сигналы АЭ. Результаты регистрации в графическом виде представлены на рис. 3, г.

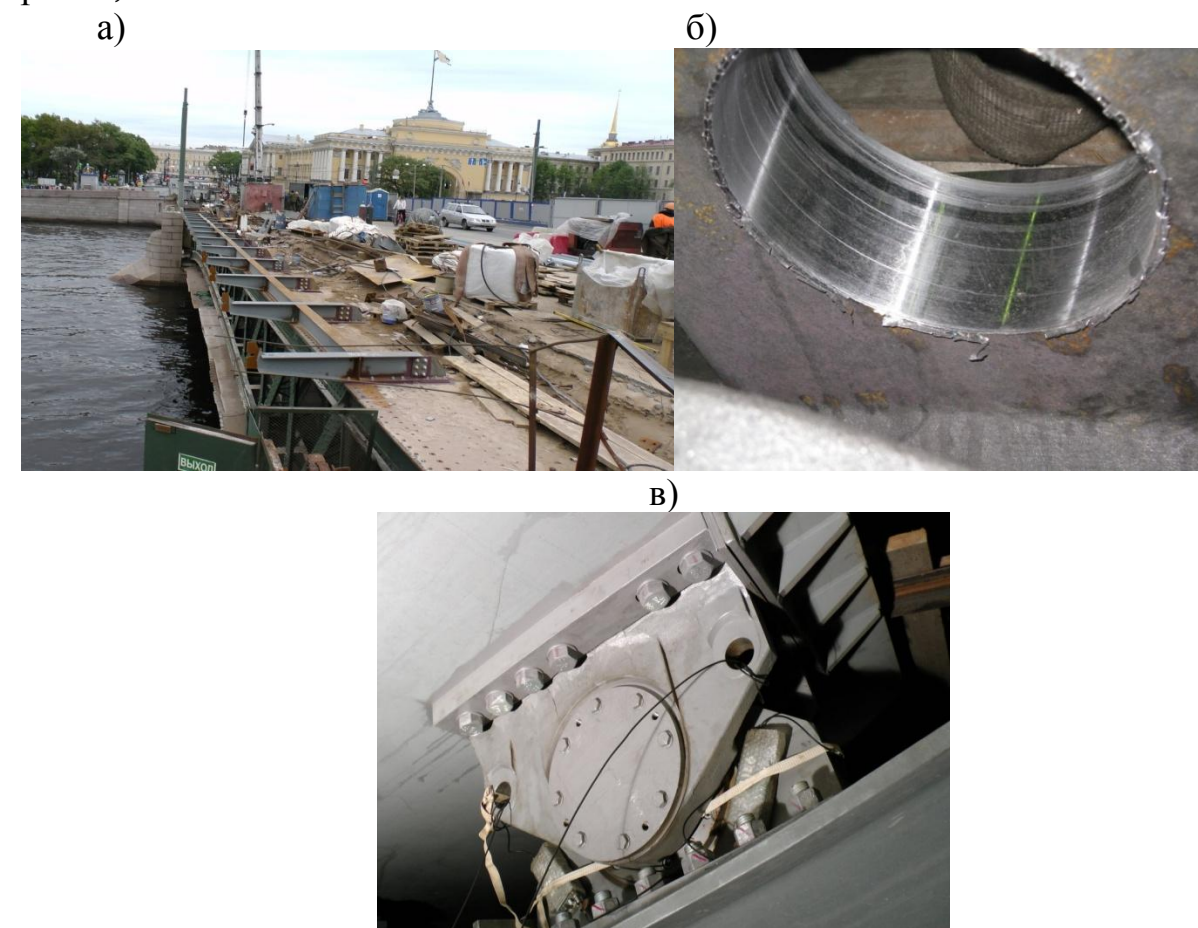


Рис. 1. Общий вид реконструируемого Дворцового моста (а), расточенное отверстие (б) и испытания (в) опоры противовеса

Линии 23, 24 и 25 соответствуют композициям экспоненциального распределения с дискретным двухзначным распределением. Из рассмотрения топографической диаграммы распределений следует, что существует целое множество низкоэнтропийных распределений, которые система [3], в которой определение величины энтропийного потенциала выходного параметра $\Delta\varepsilon$ динамической системы, описывается зависимостью

$$\Delta\varepsilon = \sigma \cdot K\varepsilon \tag{1}$$

где σ – величина среднеквадратического отклонения параметра; $K\varepsilon$ – энтропийный коэффициент, величина которого определяется законом распределения параметра, и построенная по алгоритму минимизации энтропийного потенциала $\Delta\varepsilon$ путём трансформации энтропийного коэффициента $K\varepsilon$, воспринимает как благоприятные состояния несмотря на то, что эти состояния являются устойчивыми неработоспособными состояниями системы. В этих состояниях системы происходит отклонение закона распределения относительно оптимального состояния, имеющего характерную степень неопределённости.

Таким образом, управление динамической системой путем минимизации энтропийного потенциала не является оптимальным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Новицкий, П. В.** Оценка погрешности результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Л. : Энергоатомиздат, 1985.
2. Электрические измерения неэлектрических величин / А. Н. Туричин [и др.]. – Л. : Энергия, 1975.
3. **Лазарев, В. Л.** Исследование систем на основе энтропийных и информационных характеристик / В. Л. Лазарев // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80. – Вып. 2.

Для практической реализации этого метода был разработан и изготовлен микропроцессорный датчик влажности, который работает на принципе отражения инфракрасного (ИК) излучения от контролируемого материала. Рассеяние и отражение на рабочих длинах волн (линии поглощения воды) сравнивают с отражением на опорных длинах волн, где практически отсутствует поглощение ИК излучения молекулами воды. По полученным соотношениям, которые являются расчетными оптическими параметрами, вычисляется влажность материала с помощью специализированного алгоритма, разработанного в результате теоретических и экспериментальных исследований.

Практическую апробацию датчик влажности прошел на Санкт-Петербургском картонно-полиграфическом комбинате. Он установлен в лаборатории входного контроля цеха приемки сырья. Из каждой партии поступившей макулатуры отбираются образцы и закладываются в датчик. На табло датчика высвечиваются влажность образца и средняя арифметическая влажность всех измеренных образцов данной партии.

Для верификации показаний датчика проводились контрольные определения влажности образцов термогравиметрическим методом. В табл. 1 приведены результаты испытаний.

Табл. 1. Результаты испытаний

Датчик влажности, %	Лаборатория, %	Расхождение %
3,2	3,5	-0,3
5,2	5,2	0
10,8	10,7	0,1
18,8	18,6	0,2
31,1	32,1	-1,0

Результаты внедрения показали, что изготовленный датчик влажности полностью обеспечивает потребности оперативного входного контроля при приемке макулатуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 10700-97.** Макулатура бумажная и картонная. Технические условия. Введ.01.01.03. – Минск : Изд-во стандартов, 2003. – 8 с.

E-mail: VLN_by@yahoo.com

УДК 620.179.14
ИНФОРМАТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ
КАЧЕСТВА ОТПУСКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ У10А

В. А. БУРАК, З. М. КОРОТКЕВИЧ
ГНУ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»
Минск, Беларусь

Известно, что потребность промышленных предприятий в качественном инструменте высока, и для гарантий качества к изделиям из инструментальных углеродистых сталей, к которым относится сталь У10А, предъявляются требования, обеспечивающие такие эксплуатационные свойства, как высокая твердость режущей кромки, износостойкость, прочность, достаточная вязкость и теплостойкость, которые достигаются термической обработкой – закалкой и последующим отпуском, снимающим большую часть закалочных напряжений [1]. Контроль качества термообработки, в особенности качества отпуска, инструментальной стали У10А с использованием стандартных магнитных параметров невозможен из-за неоднозначности зависимостей стандартных магнитных характеристик от температуры отпуска. Для решения этой задачи предлагается исследовать возможность применения различных комбинаций уже известных магнитных параметров для контроля качества отпуска изделий из инструментальной углеродистой стали У10А.

Измерения магнитных параметров образцов из стали У10А осуществлялись в квазистатическом режиме перемагничивания на установке УИМХ [2], предназначенной для получения основной кривой намагничивания и петли магнитного гистерезиса материала. Частота перемагничивания составляла 0,05 Гц. Измерения проводили на кольцевых образцах с внешним диаметром 17 мм, внутренним диаметром 13,2 мм и высотой 10 мм, закаленных от 770 °С и отпущенных при разных температурах.

В [3] для повышения достоверности контроля рекомендуется вести контроль по двум параметрам: коэрцитивной силе H_c и намагниченности насыщения M_s , а также по коэрцитивной силе H_c и релаксационной магнитной проницаемости μ_r . Однако для стали У10А применение сочетания этих параметров затруднительно, так как величины намагниченности насыщения M_s и релаксационной магнитной проницаемости μ_r при повышении температуры отпуска изменяются незначительно.

В качестве информативных параметров анализировались сумма, разность, произведение и частное от деления составляющих магнитных параметров по предельной петле магнитного гистерезиса и по основной кривой намагничивания. Для обеспечения одинакового влияния каждого из анализируемых магнитных параметров на информативные параметры при проведении арифметических операций над разными, по физической сути и по

Отклонение от заданного оптимального состояния приведет систему к переходу в низкоэнтропийное состояние. На топографической диаграмме распределений подобные отклонения показаны в виде переходов 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20.

Различие в поведении системы, находящейся в области оптимального состояния с большим значением коэффициента энтропии и системы, перешедшей в одно из неблагоприятных состояний с низким значением энтропии, показывает что, в этом случае результаты измерения выходного параметра системы сгруппированы в области его математического ожидания, и, следовательно, наиболее приближены к оптимальному значению наблюдаемого параметра.

Переход динамической системы в низкоэнтропийное состояние может быть вызван появлением в отдельных узлах системы больших сил трения или других форм гистерезиса значений выходного параметра, которому на топографической диаграмме (см. рисунок 1) соответствует участок кривой 3 между точками 12 и 1. Дальнейшее увеличение внутренних сил трения приводит систему в ещё более низкоэнтропийное состояние с дискретными распределениями выходного параметра. Положение таких состояний задано участком кривой между точками 12 и 13, где энтропийный коэффициент меньше 0,2. Кривая 20 иллюстрирует возможное направление подобного перехода. При переходе динамической системы в состояние с дискретными значениями выходного параметра все значения выходного параметра будут находиться на расстоянии СКО относительно математического ожидания и, как следствие, будут наиболее удалены относительно наиболее благоприятного параметра системы. При этом энтропийный потенциал системы Δs стремится к нулю. Так как управление системой осуществляется на основе минимизации энтропийного потенциала Δs , то подобное нерабочее состояние системы будет восприниматься как благоприятное.

Появление в течение длительного времени фиксированных неизменных значений выходного параметра при наличии случайных входных воздействий и случайных внешних влияющих факторов также указывает на неблагоприятное или нерабочее состояние системы, которое возможно вызвано выходом из строя её отдельных узлов. На топографической диаграмме эти состояния расположены на кривой экспоненциальных распределений 1 в точках 6, 21 и 22 с параметрами формы равными 1/2, 1/3 и 1/4 соответственно. В этом случае все измеренные значения выходного параметра группируются непосредственно вблизи математического ожидания, которое может находиться на значительном удалении от его оптимального результата. В связи с низким значением энтропийного коэффициента, это состояние также имеет значение энтропийного потенциала меньшее, чем в оптимальном состоянии, поэтому динамическая система воспринимает это состояние также как благоприятное.

Д. И. НЕФЕДЬЕВ, В. Г. ПОЛОСИН, О. Н. БОДИН
ФГБОУ ВПО «ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Пенза, Россия

Для выявления особенностей управления на основе минимизации энтропийного потенциала рассмотрим описание поведения динамической системы в пространстве энтропийного коэффициента и контрэксцесса. Топографическая диаграмма на рис. 1, построенная в соответствии с известными работами Новицкого П.В. [1, 2], иллюстрирует изменения состояний динамической системы в осях коэффициента энтропии и контрэксцесса распределения выходного параметра.

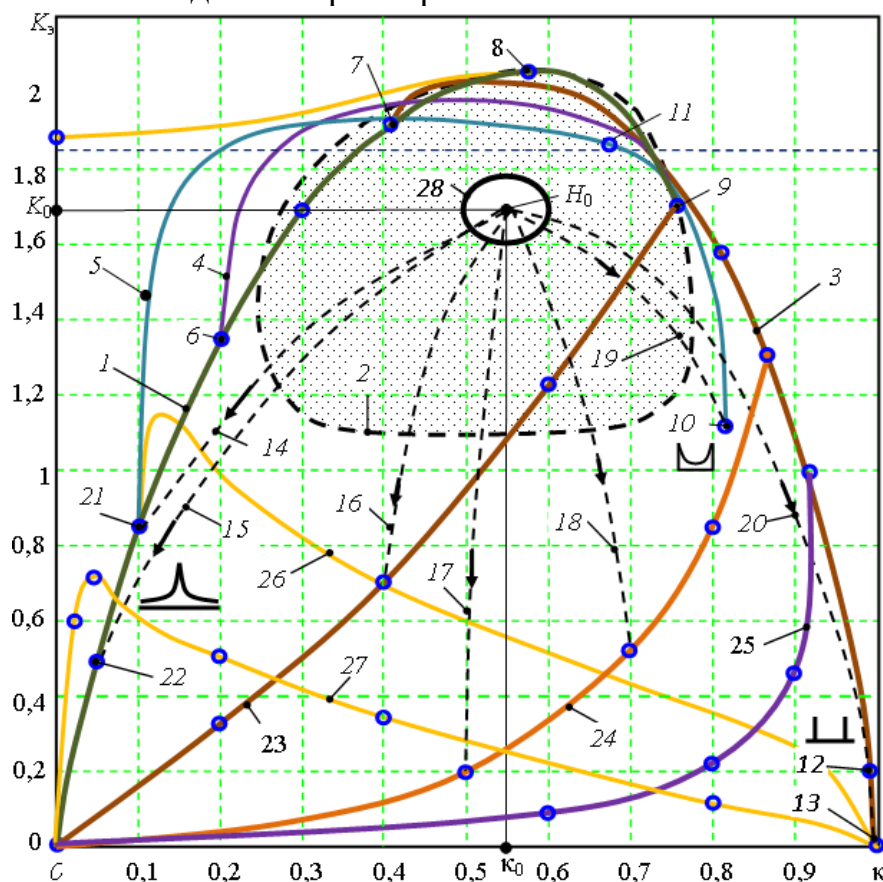


Рис. 1. Топографическая диаграмма

В пространстве энтропийного коэффициента K_0 оптимальной работе системы соответствует состояние H_0 , для которого характерен коэффициент энтропии K_0 . Линия 2 ограничивает часть пространства возможного положения состояния произвольной системы при её оптимальной работе.

абсолютной величине, магнитными параметрами, рассматривались их значения относительно закаленного состояния.

Было установлено, что информативный параметр U (рис. 1), представляющий собой частное от деления релаксационной намагниченности M_{Hr} на максимальную магнитную проницаемость μ_m , является наиболее предпочтительным для неразрушающего контроля качества отпуска стали У10А, так как он обеспечивает возможность контроля среднетемпературного отпуска и отбраковку изделий, отпущенных при более низкой или при более высокой температурах, при которых определение температуры отпуска по параметру U проблематично. Чувствительность предложенного информативного параметра составляет порядка 0,15 %/°С во всем диапазоне изменения температуры отпуска.

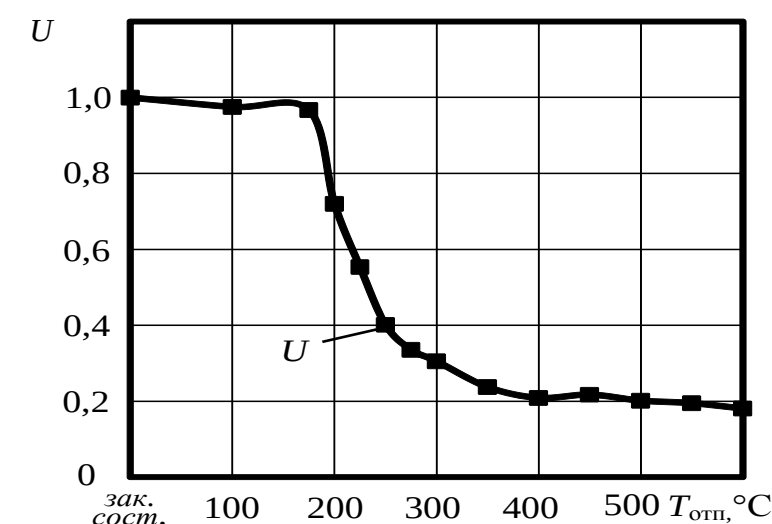


Рис. 1. Зависимость информативного параметра $U = \frac{M_{Hr}}{M_{Hr}^{зак}} \cdot \frac{\mu_m}{\mu_m^{зак}}$ от температуры отпуска стали У10А

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геллер, Ю. А. Инструментальные стали: научное издание / Ю. А. Геллер. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1983. – 527 с.
2. Матюк, В. Ф. Установка УИМХ для измерения магнитных характеристик магнитомягких материалов и изделий / В. Ф. Матюк, А. А. Осипов // Дефектоскопия. – 2007. – № 3. – С. 12–25.
3. Магнитный контроль изделий из сталей 7Х3, 9ХФ, 50ХНМ, У10А после низко- и среднетемпературного отпуска / Горкунов Э.С. [и др.] // Дефектоскопия. – 1990. – № 1. – С. 70–76.

E-mail: veronika.burak@gmail.com
kzm@iaph.bas-net.by

УДК 539.3

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРУБ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ю. В. ВАСИЛЕВИЧ, Е. Ю. НЕУМЕРЖИЦКАЯ, В. В. МОЖАРОВСКИЙ
«БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Минск, Беларусь

Широкое распространение в технике и перспективы использования трубчатых элементов конструкций (трубопроводов, корпусных деталей в виде пологих цилиндрических оболочек) из полимерных композиционных материалов (ПКМ) обусловлено технологичностью, низким весом, достаточной прочностью и высокой коррозионной стойкостью указанных изделий. Однако их механические испытания являются длительными и трудоемкими, в особенности при высоких температурах, характерных для эксплуатации указанных изделий. Данные натурных испытаний трубчатых элементов далеко не всегда удовлетворительно согласуются с результатами механических испытаний стандартных образцов. Это затрудняет выполнение и проверку расчетов реальных конструкций, в первую очередь, трубопроводов, из композиционных материалов. Решение указанной проблемы усложняется при оценке прочности и деформативности труб из направленно-армированных (волоконистых и тканевых) ПКМ вследствие, их выраженной анизотропии. Существенная зависимость деформационно-прочностных свойств таких ПКМ от рецептуры и схемы армирования увеличивает необходимый объем испытаний. Отсюда следует необходимость совершенствования методов механических испытаний труб из композиционных материалов на основе полимеров при повышенных температурах и для различных видов нагрузок.

Целесообразна разработка методов испытаний, исключаящих необходимость использования крупногабаритных образцов труб и дорогостоящего гидравлического оборудования для создания испытательного давления в таких образцах. Существующая теория расчета слоистых анизотропных цилиндрических оболочек позволяет связать искомые деформационно-прочностные характеристики труб с механическими характеристиками материалов элементарного слоя или группы слоев, получаемых из стандартных механических испытаний на образцах простой формы. В частности, к таковым можно отнести испытания на растяжение лопаток, полосок и колец, а также призматических или цилиндрических образцов на сжатие с приложением сжимающей нагрузки на торцевую или боковую поверхности. Для ускорения испытаний труб на ползучесть и релаксацию может быть использована температурно-временная аналогия. Представляется также необходимым обеспечение адекватности испытаний путем одновре-

или значительной поврежденности элементов оборудования дополнительно исследуют степень поврежденности оборудования. Преимуществом первого подхода является его меньшая трудоемкость, второго – более точный прогноз, возможность выявления дополнительного резерва ресурса оборудования.

В зависимости от требуемой достоверности прогноза и возможностей получения информации применяют два подхода к прогнозированию: упрощенный, основанный на детерминистических оценках показателей, и уточненный, основанный на вероятностных оценках.

При первом, отклонения контролируемых параметров относят к погрешностям методов контроля, случайным помехам и при прогнозировании остаточного ресурса в расчетах учитывают с помощью коэффициентов запасов. При втором подходе колебания наблюдаемых параметров используют в качестве дополнительной информации, что позволяет повысить достоверность прогнозирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техническая диагностика. Оценка состояния и прогнозирование остаточного ресурса технически сложных объектов: учеб. пособие / А. Г. Дмитриенко [и др.] / Под ред. Д. И. Нефедьева, Б. В. Цыпина. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – 64 с.
2. **ГОСТ 27.002-89.** Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
3. **РД 09-102-95.** Методические указания по определению остаточного ресурса потенциально опасных объектов, поднадзорных Госгортехнадзору России.
4. **ГОСТ Р 22.2.05-94.** Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные аварии и катастрофы. Нормируемые метрологические и точностные характеристики средств контроля и испытаний в составе сложных технических систем, формы и процедуры их метрологического обслуживания. Основные положения и правила.
5. **Фандеев, В. П.** Модели, методы и алгоритмы оптимизации диагностирования приборов : учеб. пособие / В. П. Фандеев, В. С. Волков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2007. – 76 с.

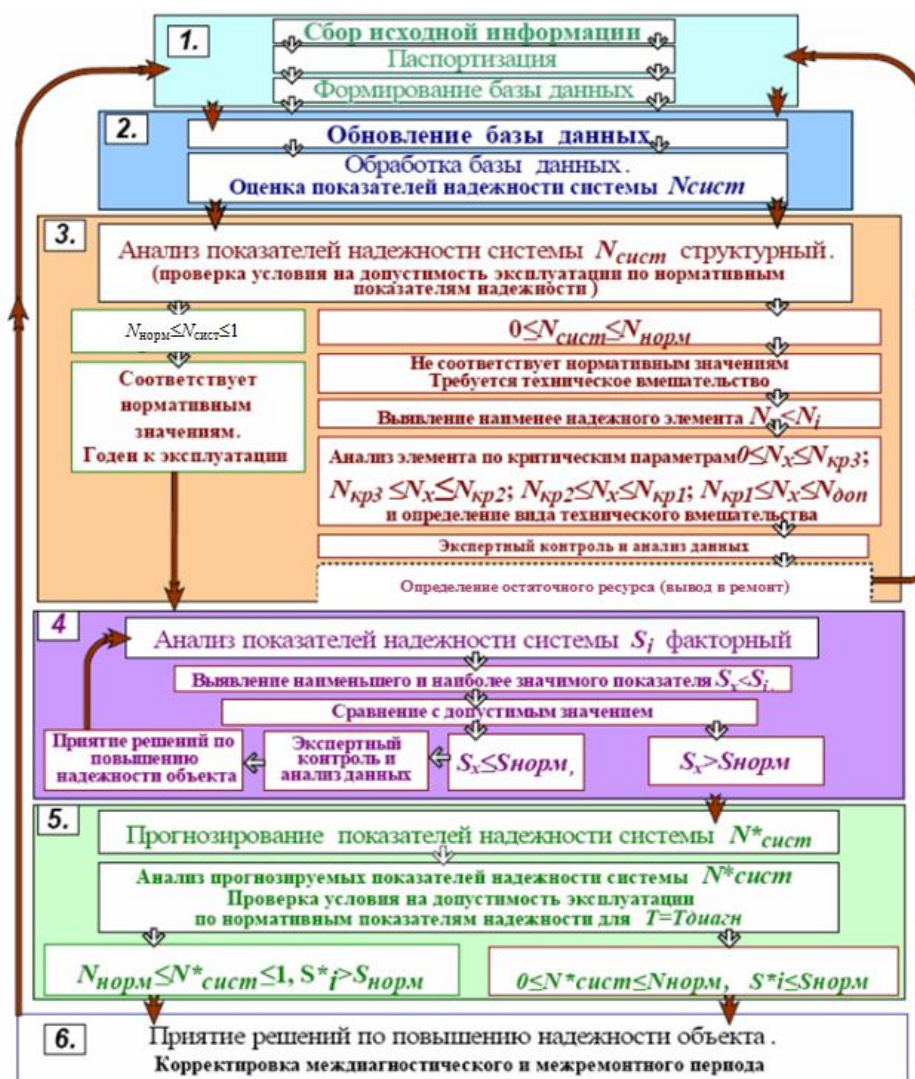


Рис. 1. Алгоритм функционирования СМ и К ТСО при определении остаточного ресурса по показателям надёжности

Здесь N_m – функция надежности (например, сохраняемость) системы уровня сложности m ; S_{im-1} – показатель надежности на иерархическом уровне $(m-1)$ (по структурной или факторной схеме); i – номер показателя $i \in [1; n]$; k_i – весовой коэффициент значимости для i -го показателя. Качественный и количественный состав показателей S_i определяется индивидуально для каждой системы на различных иерархических уровнях с учетом функциональных характеристик технологической схемы объекта. Значения k_i рассчитываются по многофакторным математическим моделям или методом экспертных оценок [5].

При прогнозировании в зависимости от срока эксплуатации оборудования применяют два подхода. При малом сроке эксплуатации (относительно нормативного) и незначительной поврежденности оборудования для прогнозирования его остаточного ресурса используют только информацию о нагруженности. При сроке эксплуатации близком к нормативному

менного воздействия силовых факторов (внутреннего давления, изгиба, растяжения) и жидкой среды, способствующей разупрочнению материала трубы. Представляет интерес также учет динамических воздействий в виде гидравлических ударов, термоциклирования, вследствие резкого перепада температур, монтажных усилий и эксплуатационных нагрузок импульсного характера.

Реализация испытаний, учитывающих вышеуказанные факторы, способствует особенности вязкоупругого поведения полимеров. Так, при малых напряжениях, в стеклообразном состоянии возникает только упругая деформация, а в высокоэластичном состоянии доминирует высокоэластичная деформация (упругая составляющая становится пренебрежимо малой). Нагрузки, вызывающие разрушение труб, приводят к значительным деформациям, что облегчает их регистрацию. Необратимые деформации, возникающие наряду с упругой и высокоэластичной деформациями, могут регистрироваться при сравнительно небольших нагрузках, и для характеристики таких деформаций можно использовать сдвиговое нагружение. Это позволяет определить начало пластического деформирования и характер упрочнения указанных материалов в стадии текучести, что, в свою очередь, позволяет выявить резервы прочности (живучесть) трубчатых элементов.

Для оценки деформационно-прочностных характеристик (модулей упругости, предела прочности и текучести, и т. д) труб, как правило, используются гидравлические давления. Для определения вышеуказанных механических характеристик наибольшее распространение получили способы статических испытаний материалов при одноосном напряженном состоянии. Одноосное напряженное состояние при растяжении реализуют, используя образцы в виде полосок или двусторонних лопаток с постоянным поперечным сечением рабочей части.

Недостатком известных методов испытаний является необходимость центрирования и трудность закрепления образцов в захватах испытательной машины, связанная с требованием исключения проскальзывания и разрушения концевых частей образца. Отмеченные недостатки значительно усиливаются при испытании на растяжение хрупких композитных материалов.

Эти ограничения устраняются в случае применения трехслойных блоков. Вместе с тем, более сложное и дорогостоящее изготовление образцов указанного типа ограничивает их использование.

Применительно к трубчатым элементам конструкций из армированных композитов, полученных методом намотки, используют кольцевые образцы, испытываемые нагрузками, приложенными в плоскости кольца, вырезанного из трубы. Нагружение колец внутренним давлением может производиться при помощи жестких полудисков (секторов) и резиновых колец, пластичного вещества или жидкости. Недостатком способа испыта-

ний с применением жестких полудисков или секторов является неравномерность давления по окружности кольца. Кроме того, действующие в кольце внутренние напряжения, помимо растяжения, включают значительную изгибную компоненту, что вызывает концентрацию напряжений в зоне разъема полудисков. Эти факторы приводят к погрешности определения механических характеристик материала труб, в частности, занижению пределов прочности и текучести. Указанных недостатков лишен способ, по которому нагружение трубчатого образца создается давлением рабочей среды в виде резины.

Методика была реализована в ИММС НАН Беларуси на серийном испытательном стенде СОМТЕН-94С для определения механических характеристик полимерных материалов при растяжении-сжатии. Испытывались образцы трехслойных металлополимерных труб диаметром 25,4 мм, высотой 10 мм и толщиной 1 мм.

Установлено, что незначительное сопротивление вязкопластичного эластомера деформации сдвига обеспечивает напряженное состояние испытуемого образца, близкое к одноосному, что способствует уточнению определения механических характеристик материала.

Вместе с тем, высокая вязкость используемого рабочего тела, по сравнению с жидкостями, приводит к радикальному снижению его утечки через зазоры сопряжений, позволяя осуществить нагружение образцов на серийных испытательных машинах (прессах) без использования гидравлического оборудования, упростить герметизацию и устранить загрязнение окружающей среды.

Сохранение вязкопластичных свойств эластомера, в широком интервале температур и скоростей нагружения, расширяет область использования предлагаемого способа. Достаточная когезия вязкопластичного эластомера обеспечивает его сплошность при заполнении нагрузочной камеры и проведении испытания, в том числе, при низкой температуре. Это также дает возможность повысить эффективность испытаний путем минимизации расхода эластомера и его повторного использования без дополнительной тепловой обработки.

Благодаря адгезии эластомера к образцу снижается вероятность разлета осколков в момент разрушения, что способствует безопасному проведению как статических, так и ударных испытаний, в особенности, хрупких материалов.

Таким образом, использование рабочего тела в виде вязкопластичного эластомера обеспечивает повышение точности и эффективности определения механических характеристик материала при растяжении по сравнению с известными методиками.

E-mail: vasilevich@bsu.by

УДК 681.02
ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И КОНТРОЛЯ
ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТЕХНИЧЕСКИ
СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Д. И. НЕФЕДЬЕВ, В. С. ВОЛКОВ, И. Н. БАРИНОВ, А. А. ТРОФИМОВ
ФГБОУ ВПО «ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Пенза, Россия

В современных условиях технически сложные объекты (ТСО) различного, в том числе специального назначения, должны отвечать комплексу требований по обеспечению работоспособности в условиях воздействия влияющих факторов, агрессивных сред, электромагнитных полей и т.д. Вместе с тем элементы ТСО непрерывно усложняются функционально, что требует высокой степени интеграции механических, электронных, оптических элементов силовых и информационных подсистем. Все это требует непрерывного мониторинга и контроля параметров ТСО для обеспечения надлежащего функционирования, что, в свою очередь, требует создания комплексных систем мониторинга и контроля (СМиК), в задачи которых входит получение информации и параметрах функционирования ТСО в реальном масштабе времени и анализ этой информации для определения текущего состояния объекта [1].

Большая часть эксплуатационных и технологических отказов проявляется постепенно в изменении одного или нескольких выходных параметров, поэтому их называют также параметрическими. Контролируемыми параметрами могут быть как непосредственно намеряемые величины повреждений, так и выходные параметры оборудования. Далее эти параметры, контроль которых позволяет прогнозировать моменты наступления отказов оборудования, называются параметрами технического состояния, или сокращенно ПТС. В соответствии с [2] отказом оборудования считается нарушение его работоспособного состояния. Если оборудование после отказа или технического освидетельствования не подлежит восстановлению, то такое состояние называют предельным состоянием (ПС) оборудования. Нецелесообразность восстановления оборудования, имеющего повреждение, может быть обусловлена как технико-экономическими показателями, так и нарушениями установленных требований безопасности (экологии) [3, 4]. Признаки предельного состояния оборудования, установленные в НТД, называются критериями предельного состояния (КПС). Остаточным ресурсом называют запас возможной наработки оборудования после момента контроля его технического состояния (или ремонта), в течение которого обеспечивается соответствие, требованиям НТД всех его основных технико-эксплуатационных показателей и показателей безопасности. Возможный алгоритм СМиК ТСО по показателям надёжности представлен на рис. 1.

Блок формирования описывается линейным СКРУ (1). В нелинейном блоке вектор $\mathbf{x}_k$ подвергается нелинейному функциональному преобразованию в соответствии с формулой $\mathbf{y}_{k+1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_k)$, где $\mathbf{f}(\mathbf{x}_k)$ есть векторная функция размерности S . Таким образом, линейно-нелинейная модель динамического изображения задается системой уравнений

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k, \mathbf{y}_{k+1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_k). \quad (3)$$

Размерность этой системы вдвое превышает размерность моделируемого изображения $\mathbf{y}_{k+1}$, т. е. равна $2S$. Выбором нелинейной функции $\mathbf{f}(\mathbf{x}_k)$ можно добиться желаемого закона распределения яркости. При нелинейных функциональных преобразованиях свойства марковости процесса $\mathbf{y}_{k+1}$ не нарушаются, поэтому линейно-нелинейная модель также является марковской.

Рассмотрена задача моделирования полей концентрации электронов в ионосфере на основе многомерных линейных и нелинейных стохастических конечно-разностных уравнений марковского типа. Приведены общие соотношения для нахождения математических ожиданий и ковариационных характеристик изображений. Предложен вариант нелинейной модели, состоящий из последовательного соединения линейного гауссова порождающего изображения и его нелинейного функционального преобразования. Результаты моделирования показали, что предложенные модели с достаточной точностью аппроксимируют поля концентрации электронов в ионосфере и могут служить основой для разработки алгоритмов радиотомографии ионосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Куницын, В. Е.** Томография ионосферы / В. Е. Куницын, Е. Д. Терещенко. – М. : Наука, 1991.
2. **Austen, J. R.** Ionospheric imaging using computerized tomography / J. R. Austen, S. J. Franke, C. H. Liu // *Radio Sci.* – 1988. – № 23. – P. 299–307.
3. **Стратонович, Р. Л.** Условные марковские процессы и их применение к теории оптимального управления / Р. Л. Стратонович. – М. : МГУ, 1966.
4. **Ярлыков, М. С.** Марковская теория оценивания случайных процессов / М. С. Ярлыков, М. А. Миронов. – М. : Радио и связь, 1993.

УДК 620.179 УЧЕТ СТРУКТУРНОЙ И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ КАЛИБРОВОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ КОНТРОЛЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ ЭФФЕКТА БАРКГАУЗЕНА

Д. А. ВИНТОВ, В. Л. ВЕНГРИНОВИЧ, В. А. ЛАПИЦКАЯ
ГНУ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»
Минск, Беларусь

Основной проблемой, которая встречается при неразрушающем контроле остаточных напряжений в исследуемом материале с неизвестным состоянием поверхности, является влияние ее структурной и геометрической неоднородности на параметры измеряемого сигнала, например, шума Баркгаузена (ШБ) [1, 2]. Поэтому любая калибровка, обычно, происходит при неизвестных заранее остаточных напряжениях в образце. Поскольку, вследствие условия равновесия, можно предполагать полную релаксацию остаточных макроскопических напряжений при вырезке образца, постольку их главным источником остаются поверхностные остаточные напряжения, которые вызваны предисторией обработки, и величина которых, в общем случае, неизвестна. В [3] Тиитто предложил компенсировать остаточные напряжения простым путем: найти на калибровочной кривой нулевую точку, лежащую на ее середине, и принять соответствующее ей значение напряжения за ноль, сместив в эту точку ось ординат. Однако эта компенсация относится только к той части напряжений, которая релаксирует при вырезке образца. При наличии остаточных напряжений в поверхностном слое такой релаксации не происходит. Благодаря этому, при контроле напряжений наблюдается сильная чувствительность показаний к состоянию поверхностного слоя. В настоящей работе на примере метода эффекта Баркгаузена сделана попытка на этапе построения калибровочной характеристики уменьшить влияние этого фактора на неопределенность контроля.

Калибровочная характеристика представляет собой график зависимости $V = f(\sigma)$, измеренной интенсивности ШБ, V , от величины соответствующего упругого напряжения σ , которое создается в образце путем его одноосного двустороннего изгиба. Согласно ранее предложенному авторами способу, на одной координатной плоскости строятся две такие характеристики, которые соответствуют продольному и поперечному намагничиванию образца в процессе калибровки (рис. 1). Точка пересечения данных зависимостей называется «точкой нулевых напряжений» (ТНН) [3, 4].

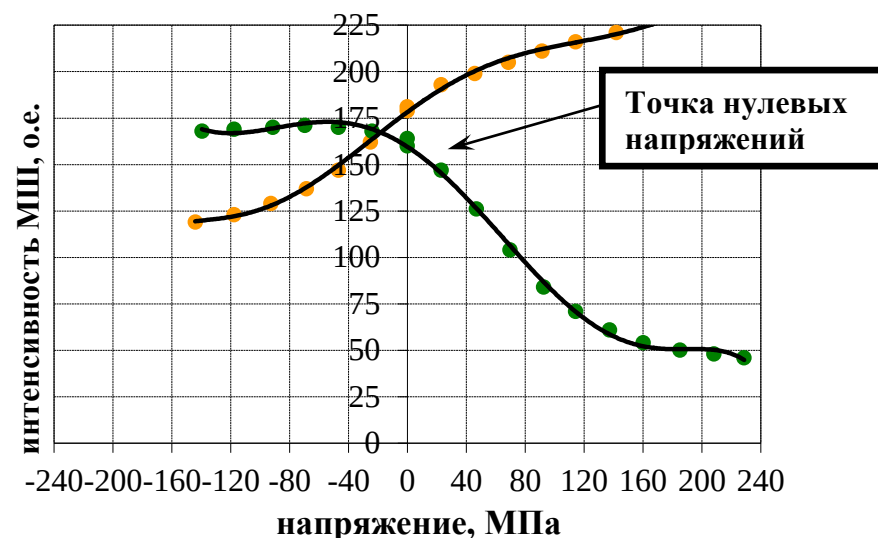


Рис. 1. Графики зависимостей $V = f(\sigma)$ при одноосном нагружении исследуемого образца. Шероховатость поверхности – $R_a = 1,25$

Представленный на рисунке график калибровочных кривых был построен для поверхности образца из ферромагнитного материала с шероховатостью $R_a = 1,25$. Возрастающая кривая – датчик вдоль оси образца.

Далее эта же поверхность образца подвергалась более тщательной механической обработке – тонкому шлифованию. В результате была достигнута шероховатость поверхности равная $R_a = 0,63$, для которой был построен график калибровочных кривых, представленный на рис. 2.

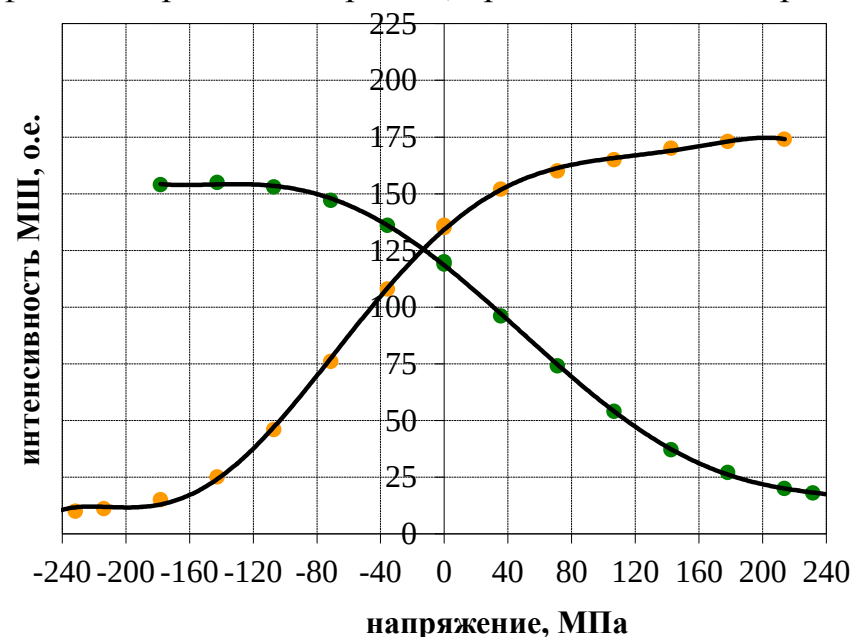


Рис. 2. Графики зависимости $V = f(\sigma)$ при одноосном нагружении исследуемого образца. Шероховатость поверхности – $R_a = 0,63$

Как видно из вышеприведенных рисунков, при изменении шероховатости поверхности исследуемого образца происходит значительное изменение величины интенсивности МШ в ТНН: 168 о.е. и 125 о.е. (рис. 1 и 2

ставляющая, определяющая математическое ожидание; w_k – формирующий белый шум с ковариационной матрицей Q_k .

Математическое ожидание модели (1) описывается разностным уравнением: $m_{k+1} = A_k m_k + u_k$ с начальным условием m_0 при $k = 0$. Уравнение для корреляционной матрицы изображения имеет вид: $\Phi_{k+1,l,k+1} = A_{k+l,k+1} (A_k P_k A_k^T + Q_k)$. При $l = 0$ матрица $\Phi_{k+1,k+1}$ равна ковариационной матрице изображения P_{k+1} с уравнением $P_{k+1} = A_k P_k A_k^T + Q_k$ и начальным условием P_0 . Диагональные элементы матрицы $\Phi_{k+l,k}$, как функции l , являются автокорреляционными функциями каждого из элементов изображения.

Нелинейная модель

В случае, когда закон распределения яркостей отличен от гауссова, необходимо использовать нелинейные модели. Нелинейный характер задачи существенно усложняет методы ее решения. Наиболее общий путь построения нелинейной модели заключается в использовании случайной марковской последовательности с нелинейным векторным стохастическим конечно-разностным уравнением (СКРУ). Теория марковских процессов разработана в общем виде, в том числе и для нелинейных задач [3, 4], однако практические методы их решения существенно сложнее линейных и, как правило, являются приближенными.

Рассмотрим нелинейную модель изображения, описываемую СКРУ

$$x_{k+1} = a_k(x_k) + u_k + w_k, \quad (2)$$

где $a_k(x_k)$ – векторная функция, нелинейно зависящая от фазовых координат (яркостей) изображения x_k .

Уравнения для математического ожидания и ковариационной матрицы модели (2) имеют вид

$$m_{k+1} = \langle a_k(x_k) \rangle + u_k, \quad P_{k+1} = \langle a_k(x_k) \cdot a_k^T(x_k) \rangle - m_k \cdot m_k^T + Q_k,$$

где $\langle a_k(x_k) \rangle = \int a_k(x_k) p(x_k) dx_k$ есть математическое ожидание векторной нелинейной функции $a_k(x_k)$, а $\langle a_k(x_k) \cdot a_k^T(x_k) \rangle = \int a_k(x_k) \cdot a_k^T(x_k) p(x_k) dx_k$.

Эти уравнения решаются с начальными условиями

$$m_0 = \int x_0 p_0(x_0) dx_0, \quad P_0 = \int (x_0 - m_0)(x_0 - m_0)^T p_0(x_0) dx_0.$$

Линейно-нелинейная модель

Предлагается более сложный вариант моделирования случайного динамического изображения путем нелинейного функционального преобразования порождающего гауссова изображения. В результате модель оказывается состоящей из двух частей – линейного блока формирования порождающего гауссова изображения и блока нелинейного функционального преобразования. Такую модель называется линейно-нелинейной.

УДК 004.932
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В
ИОНОСФЕРЕ НА ОСНОВЕ МНОГОМЕРНЫХ СТОХАСТИЧЕСКИХ
КОНЕЧНО-РАЗНОСТНЫХ УРАВНЕНИЙ

А. О. НАУМОВ, В. М. АРТЕМЬЕВ, Л. Л. КОХАН
ГНУ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»
Минск, Беларусь

Изучение структуры поля концентрации свободных электронов в ионосфере имеет важное значение для организации наземной и спутниковой радиосвязи, радиолокации, радиоастрономии, прогнозирования природных явлений, экологического мониторинга земной поверхности. Одним из наиболее эффективных средств исследования распределения концентрации электронов в ионосфере является радиотомография [1, 2]. Такая техника позволяет с помощью спутниковых средств проводить радиозондирование ионосферы в широком диапазоне различных положений приемных и передающих систем и применять томографические методы для реконструкции структуры исследуемого поля. В Институте прикладной физики в рамках программы Союзного государства «Мониторинг-СГ» ведутся работы по созданию методов, алгоритмов и программного обеспечения для реконструкции поля концентрации электронов в ионосфере по данным высокоорбитальных навигационных спутников систем GPS/ ГЛОНАСС.

Доклад посвящен первому этапу этой работы, заключающемуся в моделировании полей концентрации электронов в ионосфере. Поскольку поля имеют сложную структуру, случайную в пространстве и времени, то за основу принят статистический подход на основе многомерных стохастических конечно-разностных уравнений марковского типа [3, 4]. Специфика решения задачи моделирования состоит в необходимости учета таких факторов как высокая размерность и изменение во времени поля концентрации электронов.

Линейная модель

Когда в качестве априорных данных выступают лишь математическое ожидание и ковариационная матрица изображения, то линейная модель с гауссовым законом распределения вероятностей яркостей адекватна этому объему информации. Это допустимо, когда среднеквадратическое значение флуктуаций поля в несколько раз меньше его математического ожидания. Тогда динамическое случайное поле можно описать системой линейных стохастических конечно-разностных уравнений (СКРУ):

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k, \quad (1)$$

где: k – дискретное время; $\mathbf{x}_k$ – значение поля; матрица $\mathbf{A}_k$ определяет ковариационные и корреляционные характеристики поля; $\mathbf{u}_k$ – регулярная со-

ответственно). В то же время смещения ТНН по оси абсцисс практически не происходят, таким образом величина остаточного напряжения не изменяется при изменении величины шероховатости в данном диапазоне. Если при последующем удалении поверхностного слоя ТНН не изменяется, то данное положение калибровочной характеристики по оси абсцисс можно принять за нулевое напряжение при построении четырехпараметровой диаграммы напряжений [4]. Следует отметить, что при отсутствии на поверхности образца остаточных напряжений, «точка нулевых напряжений» всегда совпадает с нулем по оси абсцисс, а ее смещение влево или вправо от данной оси свидетельствует о присутствии в поверхностном слое остаточного напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The measurement of stress in steels of varying microstructure by magnetoacoustic and Barkhausen emission / D. J. Buttle [etc.] // Proc. Royal. Soc. Lond. – 1987. – V. A 414. – P. 469–497.
2. Венгринович, В. Л. Новые возможности НК напряжений методом эффекта Баркгаузена / В. Л., Венгринович, Ю. Б. Денкевич, В. Л. Цукерман // В мире неразрушающего контроля. – 2005. – №1(27).
3. Пат. US4977373. Barkhausen noise method for determining biaxial stresses in ferromagnetic materials / Seppo I. Tiitto; заявитель и патентообладатель American Stress Technologies, Inc. – № US 07/332,478; заявл. 01.10. 09; опубл. 30.06.11.
4. Пат. 14962 С1 Респ. Беларусь, МПК⁸ G 01N 27/72. Способ калибровки чувствительности магнитошумового устройства неразрушающего контроля упругой деформации и остаточной пластической деформации в ферромагнитном материале / В. Л. Венгринович, Д. В. Дмитриевич; заявитель и патентообладатель ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси». – № а 20091401; заявл. 05.04.1989; опубл. 11.12.1990. – 5 с.

УДК 621:53.08

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПРИБОРА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД НА БАЗЕ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ДАТЧИКА

Р. И. ВОРОБЕЙ, О. К. ГУСЕВ, А. К. ТЯВЛОВСКИЙ,
К. Л. ТЯВЛОВСКИЙ, А.И. СВИСТУН, А.Э. ШУМСКИЙ
«БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Минск, Беларусь

В производственных процессах, использующих жидкие технологические среды необходимы методы определения их параметров в режиме реального времени, когда измерительные преобразователи находятся в различных участках трубопроводов на значительном удалении от систем сбора и обработки информации. В разные моменты времени по одним и тем же узлам системы, состоящей из сети трубопроводов и накопительных емкостей, перекачиваются растворы различных типов с заранее неопределёнными параметрами типа раствора, концентрации, температуры. Поэтому проведение операций контроля параметров жидких сред с требуемой погрешностью измерений невозможно без использования интеллектуальных измерительных преобразователей, самостоятельно принимающих решения о режиме и диапазоне измерений, способе компенсации погрешности от совокупности внешних факторов, характерных для выбранного режима измерения. Одной из задач при проектировании таких измерительных преобразователей является проектирование чувствительных элементов, обеспечивающих контроль нескольких параметров при использовании одного измерительного информационного канала [1].

В настоящее время существует ряд методов [1, 2], позволяющих измерять отдельные параметры жидких сред в условиях определённости состояния технологической системы и самого измерительного прибора. Их применение в сложных пространственно-распределённых технологических системах возможно при условии использования дополнительных измерительных преобразователей, что приводит к усложнению конструкции измерительной системы, ограничивает возможности диагностики состояния технологической системы в режиме реального времени и уменьшает надёжность определения диагностируемого состояния.

Применение электродных [2] чувствительных элементов приводит, с одной стороны, к необходимости снижения влияния поляризационной составляющей проводимости раствора, с другой – к возможности определения типа раствора по виду и параметрам начального участка потенциодинамической характеристики [3]. При этом методическая погрешность измерений концентрации растворов электролитов устраняется введением в процедуру измерений операции идентификации типа раствора.

Сравнение характеристик с ГОСТом			
Показатель	Требования	Расчет. значения	Результат
Плотность тепловой изоляции, кг/куб.м	не менее 60	61.0000	Соответствует
Прочность ППУ при сжатии, МПа	не менее 0.15	0.1600	Соответствует
Водопоглощение ППУ, %	не более 10	10.0000	Соответствует
Объемная доля закрытых пор ППУ, %	не менее 88	90.0000	Соответствует
Прочность на сдвиг в оевом напр., МПа	не менее 0.12	0.1400	Соответствует
Вывод: Соответствует ГОСТу! OK CloseAll			

Рис. 3. Сравнение с ГОСТ

Для определения физико-механических характеристик труб была разработана методика экспериментального исследования, которая успешно применяется при выполнении хозяйственных работ. Аналогично описанной в работе [1] методике проводились эксперименты для труб с ППУ изоляцией. Были также построены зависимости «напряжение – деформация» для материала изоляции ППУ, показанные на рис. 4.

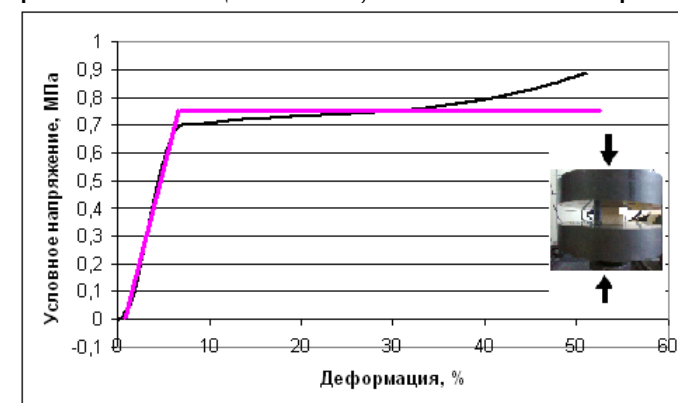


Рис. 4. Диаграмма испытания материала ППУ на сжатие: – экспериментальные результаты; — теоретические

В результате выполненной работы построена автоматизированная методика определения физико-механических свойств материалов труб с ППУ и изоляцией и оболочки ПИ-труб; разработана методика проведения экспериментов и проведены эксперименты. Предлагаемые подходы использованы в производственных процессах для труб с теплоизоляцией в виде изолирующего слоя из жесткого пенополиуретана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Можаровский, В. В.** Расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния цилиндрических труб с учетом неоднородности материала / В. В. Можаровский // Проблемы физики, математики и техники. – 2009. – № 1. – С. 77–82.

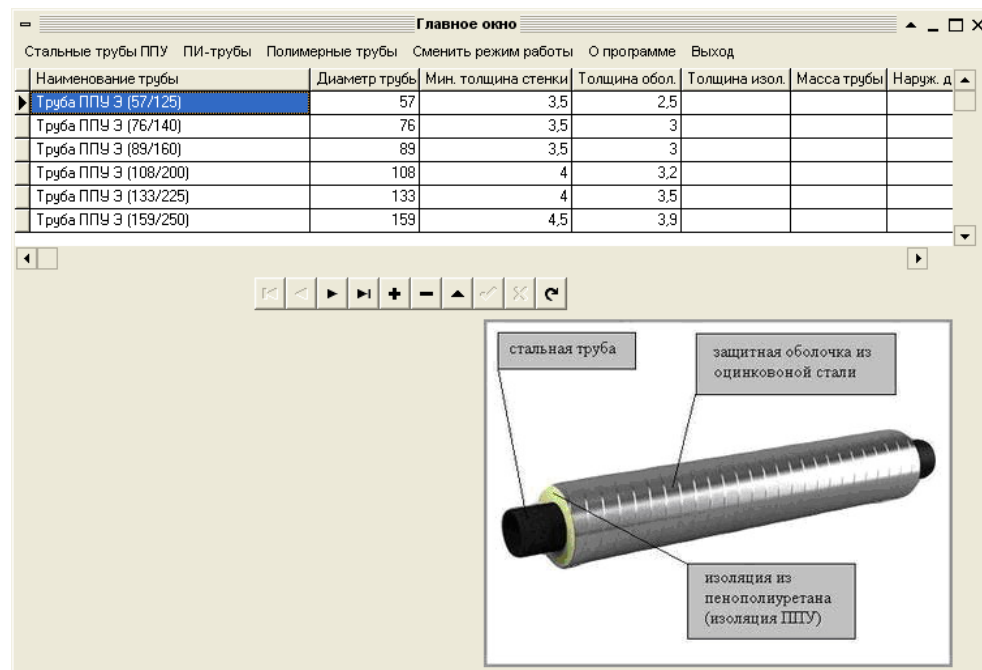


Рис. 1. Главное окно программы

После нажатия кнопки «Сохранить» рассчитанная характеристика заносится в таблицу базы данных, которая хранится в файле с расширением mdb (Access). Для некоторых характеристик доступен рисунок (согласно ГОСТ). Также в программе предусмотрена возможность построения отчетов по рассчитанным характеристикам.

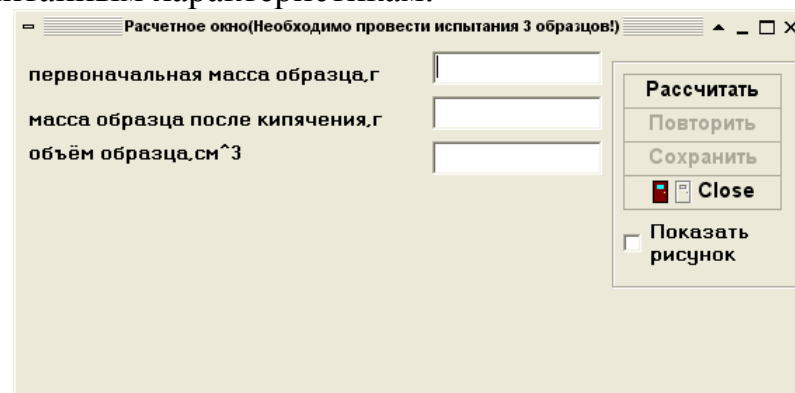


Рис. 2. Окно расчета характеристик труб

База данных построена по технологии ADO. Приложение запускается из любого места (флешка, жесткий диск) без предварительной настройки и не требует наличия на компьютере специальных программ (Borland Delphi7, BDE Administrator и т. д.). В программе предусмотрена возможность сравнения рассчитанных характеристик с ГОСТ. Появится новое окно (см. рис. 3), где для текущей трубы будет показано сравнение рассчитанных характеристик с ГОСТ и сделан вывод о соответствии или несоответствии трубы ГОСТ.

Применение трансформаторных датчиков (рис. 1) позволяет исключить влияние поляризационных эффектов на погрешность измерения проводимости раствора, однако, исключает и возможность определения типа раствора по анализу потенциодинамической характеристики.

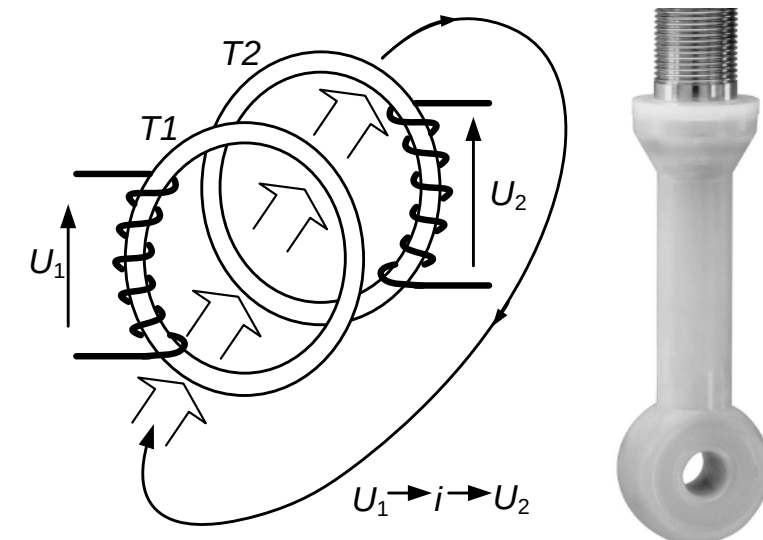


Рис. 1. Трансформаторный датчик измерения проводимости раствора

Трансформаторный датчик [4] образован двумя трансформаторами T1 и T2, связанными общей для обоих трансформаторов обмоткой, образованной одним витком раствора. Ток через раствор i пропорционален проводимости раствора. Эквивалентная схема трансформаторного датчика представлена на рис. 2. Трансформаторы T1 и T2 представлены классическими эквивалентными T-образными схемами (A и B). Элементы эквивалентной схемы, соответствующие раствору, расположены между точками S1 и S2. Индуктивность L_1 моделирует конечную подвижность ионов, а ее часть L_{1V} – значение подвижности ионов, зависящей от концентрации раствора n , представленной на модели элементом r_s .

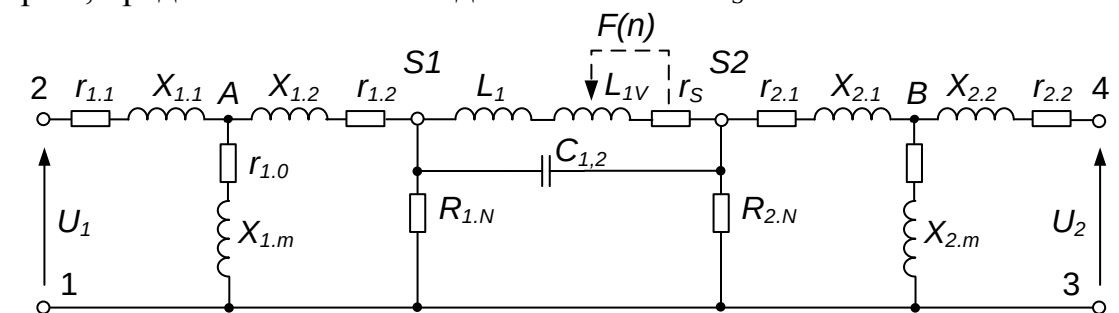


Рис. 2. Эквивалентная схема измерительной ячейки

Наличие в эквивалентной схеме измерительной ячейки на базе трансформаторного датчика инерционных элементов, параметры которых зависят от типа ионов [5], позволяет информационный сигнал от одного и того же датчика использовать для определения типа и для измерения концентрации раствора [1].

Измерительный преобразователь для адаптационного управления режимами работы и анализа многопараметрического измерительного сигнала выполнен на микроконтроллере AVR. Учитывая зависимость параметров эквивалентной схемы от температуры раствора, управляющий контроллер дополнительно осуществляет измерение температуры для внесения необходимых коррекций в результаты измерений табличным методом. Для генерации напряжения возбуждения обмотки трансформатора Т1 используется метод цифрового табличного синтеза формы генерируемого напряжения (DDS). Благодаря относительно высокой частоте напряжения возбуждения (единицы кГц) измерение индуктивной составляющей проводимости раствора производится методом измерения сдвига фаз с усреднением по нескольким периодам. Затем измеренное значение сравнивается с табличными значениями фазовых сдвигов U_1 , U_2 , характерных для различных типов растворов и экспериментально определенных ранее. Необходимость использования нескольких каналов АЦП легко реализуется для большинства современных микроконтроллеров. В отличие от работы анализатора типа раствора, контролирующего параметры начального участка потенциодинамической характеристики, в предложенном методе не требуется переключение режимов работы DDS-генератора, запоминание "уровня воды" потенциодинамической характеристики, формирование задержек в алгоритме измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гусев, О. К.** Методология и средства измерений параметров объектов с неопределенными состояниями / О. К. Гусев [и др.]; под общ. ред. О. К. Гусева. – Минск : БНТУ, 2010. – 582 с.
2. **Брусиловский, Л. П.** Приборы технологического контроля в молочной промышленности: справочник / Л. П. Брусиловский, А. Я. Вайнберг. – М. : Агропромиздат, 1990. – 288 с.
3. **Гусев, О. К.** Идентификация растворов в технологических трубопроводах на основе явления динамической поляризации / О. К. Гусев // Измерительная техника. – 2004. – № 7. – С. 60–62.
4. Сайт компании Автоматика-Север [Электронный ресурс] / Официальный дистрибьютор компании EndressHauser – Режим доступа: <http://www.avt.com.ru/techdokrus/analiz/CLS50.pdf>. –Дата доступа: 23.04.2012.
5. **Худякова, Т. А.** Теория и практика кондуктометрического и хронокондуктометрического анализа / Т. А. Худякова, А. П. Крешков; под общ. ред. А. П. Крешкова. – М. : Химия, 1976. – 304 с.

Е-mail: nilpt@bntu.by
nilpt@tut.by
tkl_psf@list.ru

УДК 539.4:621.6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ СЛОИСТЫХ ТРУБ: МОНИТОРИНГ И РАСЧЕТ

В. В. МОЖАРОВСКИЙ, Д. С. КУЗЬМЕНКОВ
УО «ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Ф. Скорины»
Гомель, Беларусь

Цель работы состоит в разработке автоматизированной методики определения физико-механических свойств материалов труб, мониторинг и расчет.

Проблема разработки современных методов оценки ресурса оборудования (различных сосудов и трубопроводов) из новых материалов, в том числе композиционных, на основе имеющейся диагностической информации, является достаточно актуальной в настоящее время. Подобные методики и соответствующие программные комплексы [1] для некоторых задач уже были созданы ранее. В работе рассматривается автоматизированная методика определения физико-механических свойств материалов труб с ППУ (пенополиуретан) и изоляцией и оболочки ПИ-труб (полиэтилен). Был разработан программный комплекс, позволяющий рассчитывать и хранить различные характеристики стальных труб с ППУ-ОЦМ изоляцией и оболочек ПИ-труб.

Существует 2 режима работы с программным комплексом: *режим просмотра*, в котором невозможно будет изменять существующие данные в таблице, и рассчитывать новые характеристики (будут недоступны соответствующие пункты меню и функции), но будут доступны: поиск, сортировка, построение отчетов, сравнение с ГОСТ; *режим расчета*, в котором программа работает в полном функциональном режиме.

После выбора режима работы появляется основное окно программы (см. рис. 1), в котором реализован расчет и хранение различных характеристик стальных труб ППУ: наружный диаметр изолированной трубы, отклонение осевой линии от оси оболочки, водопоглощение и т. д.; оболочек ПИ-труб: плотность материала, процентное содержание сажи и т. д.

В программном комплексе реализованы основные возможности приложений баз данных: вставка новых записей, удаление существующих записей, поиск по основным полям, сортировки данных по основным полям (характеристикам стальных труб ППУ, оболочек ПИ-труб) и т. д. Обработаны все возможные случаи ввода некорректных данных.

Расчет различных характеристик стальных труб ППУ и оболочек ПИ-труб (текущей выделенной трубы в таблице) осуществляется в отдельном окне (см. рис. 2). При расчете характеристик, для которых необходимо проводить расчет на 3 (или 10) образцах, рассчитывается среднее значение соответствующей характеристики (водопоглощение и др.), и кнопка «Сохранить» станет доступной только после расчета серии из 3 (10) образцов.

переменном магнитном поле позволяет отстроиться от внешних постоянных магнитных полей, а также от других магнитных полей.

Применение разработанной концепции неразрушающего контроля на исследуемом судне типа «река-море» позволило контролировать механические напряжения в корпусе судна, возникающие в процессе грузовых и балластных операций. На основании полученных значений механических напряжений изменялась последовательность и интенсивность загрузки, что вызвало достаточно равномерное распределение механических напряжений по всему корпусу судна. Отсутствие локальных перенапряжений в корпусе судна обеспечивает безопасность плавания и продлевает его срок эксплуатации. Вместе с тем, на судоремонтном заводе разработанная концепция контроля позволила существенно экономить время и улучшать качество дефектации судов, подтверждать возможность их безопасной эксплуатации, уточнять объем предстоящего ремонта с заменой напряженных участков либо принимать решение относительно вывода судна из эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Повреждения и пути совершенствования судовых конструкций / Н. В. Барабанов [и др.] – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Судостроение, 1989. – 256 с.
2. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В. В. Клюев [и др.] / Под ред. В. В. Клюева. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Машиностроение, 2003. – 656 с.
3. **ГОСТ 18353-79.** Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – М. : Изд-во стандартов, 1979. – 18 с.
4. **Miroshnikov, V.** Model of the relationship of residual magnetization and the elastic stress of ship's hulls during cargo and ballast operations / V. Miroshnikov, O. Zavalniuk, V. Nesterenko // TEKA commission of motorization and energetics in agriculture. – Lublin-Rzeszów : Polish Academy of Sciences, 2013. – Vol. 13. – № 4. – P. 174–183.
5. **Мирошников, В. В.** Анализ возможности магнитного контроля напряженно-деформированного состояния изделий / В. В. Мирошников, В. Б. Нестеренко, А. С. Торопов // Вісн. Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля: Науковий журнал. – Луганськ: Видавництво Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2013. – № 16 (205). – Частина 2 – С. 159–163.

E-mail: v.miroshnikov@mail.ru
nesterenko_mast@mail.ru
olga-zavalnjuk@mail.ru

УДК 620.179.14

ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВУСЛОЙНОГО ФЕРРОМАГНЕТИКА, СОСТАВЛЕННОГО ИЗ КОМПОНЕНТОВ С МАГНИТОСТРИКЦИЕЙ РАЗНЫХ ЗНАКОВ, ПРИ УПРУГОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Э. С. ГОРКУНОВ, Ю. В. СУБАЧЕВ, А. М. ПОВОЛОЦКАЯ,
С. М. ЗАДВОРКИН
ФГБУН «ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ УрО РАН»
Екатеринбург, Россия

Изделия и элементы конструкций из композиционных материалов (КМ), имеющие в своем составе компоненты с различными физико-механическими свойствами, находят широкое применение. Однако проблема диагностики деталей машин и элементов металлоконструкций, изготовленных из таких материалов, до сих пор не решена, в том числе из-за неполного понимания роли магнитоупругого эффекта в формировании магнитных свойств КМ, а также вклада каждого компонента в его магнитные характеристики. Различия в механических свойствах составляющих КМ под действием приложенной нагрузки приводят к различному напряженному состоянию каждого из компонентов. Когда составляющие КМ представляют собой, к примеру, сплавы на основе железа (стали), возможна такая ситуация, что при одной и той же деформации магнитоэлектрических компонентов будут иметь противоположные знаки. В такой постановке задачи вклад отдельных компонентов в магнитные свойства КМ в литературе рассмотрен не был.

В работе представлены результаты исследования закономерностей поведения ряда магнитных характеристик, в том числе магнитоэлектрических, материалов армко-железа, магнитоэлектрический которого в ненагруженном состоянии положительна, и никеля, магнитоэлектрический которого отрицательна, а также модельного двухслойного материала, составленного из них, при упругом деформировании одноосным растяжением (сжатием).

На рис. 1 представлены зависимости магнитных характеристик (коэрцитивной силы, остаточной индукции и максимальной магнитной проницаемости), измеренных в условиях замкнутой магнитной цепи, от величины приложенных напряжений для образцов из армко-железа, никеля и составного образца Fe-Ni. Под действием сжимающих напряжений магнитная проницаемость армко-железа существенно снижается, а магнитная проницаемость никеля увеличивается. Вследствие этого, в составном двухслойном образце происходит перераспределение магнитного потока, преимущественно в сторону составляющей из никеля, поэтому именно она вносит основной вклад в магнитные свойства двухслойного образца. Под действием растягивающих напряжений магнитные характеристики состав-

ного образца принимают промежуточные значения между значениями магнитных характеристик материалов слоев и более близкие по величине к значениям, полученным для Ni. На характер поведения кривых $H_c(\sigma)$, $B_r(\sigma)$, $\mu_{\max}(\sigma)$ составного образца при растяжении оказывают влияние оба составляющих слоя: вклад Fe обусловлен высокой магнитной проницаемостью, на порядок превышающей магнитную проницаемость Ni, а вклад никеля объясняется тем, что его поперечное сечение в составном образце превышает сечение армко-железа в 4 раза.

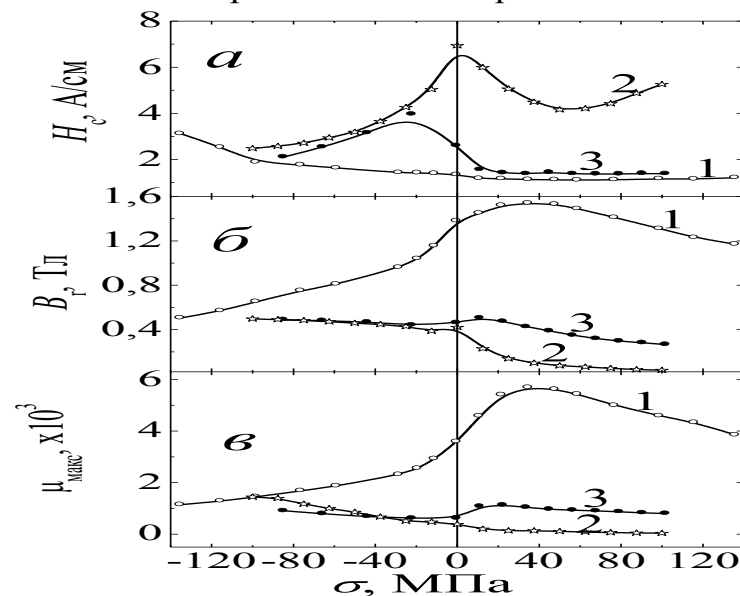


Рис. 1. Зависимости от приложенных напряжений значений коэрцитивной силы (а), остаточной индукции (б) и максимальной магнитной проницаемости (в), измеренные в условиях замкнутой магнитной цепи. Кривые 1 – для образца из армко-железа, кривые 2 – для образца из Ni, кривые 3 – для составного образца

Установлен характер изменения магнитострикции составного образца Fe-Ni при увеличении приложенных растягивающих и сжимающих напряжений. Отмечено, что на деформационное поведение полевых зависимостей магнитострикции составного образца, измеренных со стороны одной составляющей, существенное влияние оказывает вторая, удаленная от измерительного устройства составляющая. В частности, это влияние проявляется в наличии в слабых полях особенностей в виде нехарактерных положительных или отрицательных участков при максимальных растягивающих и сжимающих напряжениях при измерениях магнитострикции составного образца, соответственно, со стороны никеля и армко-железа (см. рис. 2 и 3).

мента судового корпуса только в зоне его размещения. Это, а также необходимость постоянного контакта с поверхностью контролируемого объекта, существенно ограничивает их функциональные возможности и широкое применение.

В тоже время, современные средства контроля механических напряжений ферромагнитных стальных конструкций часто базируются на магнитных методах неразрушающего контроля (НК) [2], которые являются наиболее перспективными для построения системы непрерывного и длительного мониторинга механических напряжений. Это связано с тем, что при воздействии на ферромагнетики больших растягивающих или сжимающих упругих напряжений могут существенно изменяться значения некоторых магнитных характеристик ферромагнитных материалов.

Целью настоящего исследования является проведение теоретических и экспериментальных исследований, которое бы позволило разработать концепцию построения на базе одного или нескольких методов неразрушающего контроля системы мониторинга наиболее нагруженных зон корпуса судна в процессе его эксплуатации.

Магнитные методы неразрушающего контроля основаны на анализе взаимодействия магнитного поля и объекта контроля и применимы лишь к конструкциям из металлов и сплавов, способных к намагничиванию. Магнитные методы НК различают по первичному информативному параметру [3], к которому могут относиться следующие магнитные величины: коэрцитивная сила, намагниченность, остаточная индукция, магнитная проницаемость, а также эффект Баркгаузена.

В ходе проведенного анализа магнитных величин было установлено, что в магнитном методе НК такой магнитный параметр, как остаточная намагниченность M_r существенно зависит от механических напряжений, а также имеет чрезвычайно большой диапазон изменения при переходе от растяжения к сжатию. В работе [4] авторами получена аппроксимирующая модель взаимосвязи остаточной намагниченности и наиболее влияющих факторов: механических напряжений в корпусе судна в процессе эксплуатации, величины зазора между контролируемой поверхностью комингса грузового трюма и измерительным преобразователем, коэрцитивной силы материала комингса. Таким образом, измеряя напряженность магнитного поля на контролируемом элементе судовой конструкции и пересчитывая ее в остаточную намагниченность, можно определять значение и знак действующих механических напряжений. При этом корпус судна находится в магнитном поле Земли и не требует дополнительного подмагничивания. Также авторами в работе [5] получена зависимость, учитывающая влияние механических напряжений на магнитные характеристики металла, что позволило моделировать магнитоупругие явления в переменных магнитных полях. Работа преобразователей по контролю напряженно-деформированного состояния несущих элементов судовых конструкций в

В. В. МИРОШНИКОВ, В. Б. НЕСТЕРЕНКО, О. П. ЗАВАЛЬНЮК
«ВОСТОЧНОУКРАИНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. В. Даля»
«ХЕРСОНСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ МОРСКАЯ АКАДЕМИЯ»
Луганск, Херсон, Украина

Мировая морская общественность уделяет большое внимание безопасности мореплавания, охране человеческой жизни на море, а также защите окружающей среды. С ростом интенсивности судоходства, а значит и риска аварийности Международная морская организация рекомендовала оборудовать крупнотоннажные суда системами мониторинга прочности корпусов судов. Однако по разным причинам судовладелец уходит от установки такого оборудования, а современная история торгового мореплавания пополняется трагическими случаями, несущими гибель судов и людей, потерю перевозимых грузов, загрязнения окружающей среды нефтяными продуктами. Среди наиболее тяжелых аварий, которые привели к разрушению судовых корпусов, необходимо отметить: т/х «ERIKА» (1999 г.), т/х «EUROBULKER» (2000 г.) т/х «PRESTIGE» (2002 г.), т/х «ВАСИЛИЙ» (2010 г.), т/х «MOL COMFORT» (2013 г.).

Как правило, эксплуатации корпуса морского судна, сопутствует длительное действие постоянно меняющихся внешних нагрузок. Характер и величина механических напряжений, возникающих при этом в корпусе судна, различны и зависят в большей степени от корректности проведения грузовых и балластных операций, условий плавания, а также многих других факторов. При некоторых неблагоприятных обстоятельствах отдельные узлы корпуса перегружаются. Из-за этого возникают риски появления чрезмерных остаточных деформаций и местных разрушений, которые, в свою очередь, могут привести к нарушению или потере судном прочности. Установлено [1], что повреждения отдельных корпусных конструкций судов вызваны недостаточной общей продольной и местной прочностью. Это обусловлено, главным образом тем, что во время эксплуатации судна не учитываются величина и распределение механических напряжений.

Системы мониторинга прочности корпусов судов включают в себя датчики механических напряжений, которые, как правило, базируются на использовании классического тензометрического метода контроля. Для повышения его чувствительности на палубе судна устанавливаются тензомосты длиной от одного метра, что приводит к существенным неудобствам при эксплуатации судна. Применение тензорезисторов либо волоконно-оптических тензометров позволяет определять деформацию несущего эле-

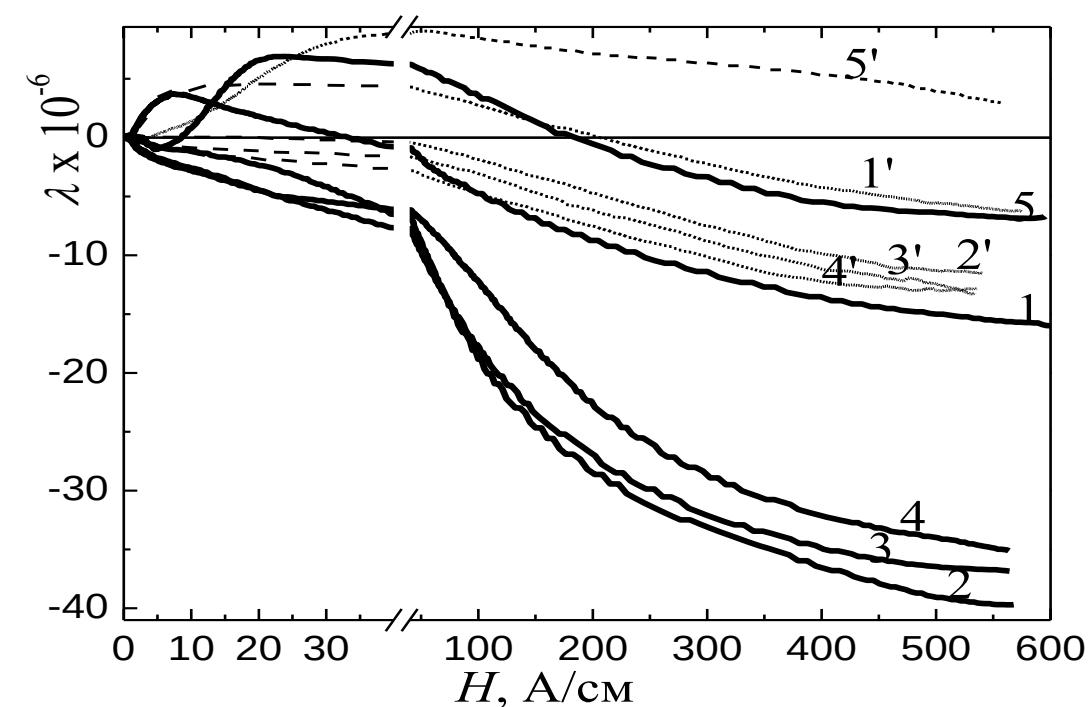


Рис. 2. Полевые зависимости магнитострикции при различных значениях приложенных напряжений. Кривые 1 - 5 – для двуслойного образца, измерения со стороны слоя из Fe, кривая 1 – $\sigma = 0$; 2 – 34; 3 – 57; 4 – 102; 5 – 85 МПа. Кривые 1' – 5' – для образца из армо-железа, кривая 1' – $\sigma = 0$; 2' – 35; 3' – 59; 4' – 99; 5' – 135 МПа

На рис. 4 приведены зависимости от приложенных напряжений относительных значений коэрцитивной силы и среднеквадратичных значений напряжений магнитных шумов Баркгаузена U , измеренных на составном образце с использованием накладных преобразователей вдоль и поперек оси приложения нагрузки как со стороны слоя из Ni, так и со стороны слоя из армо-железа. Как видно из рис. 4, к напряжениям сжатия наиболее чувствительна коэрцитивная сила, измеренная приставным датчиком со стороны материала с отрицательной магнитострикцией, а к растягивающим одноосным напряжениям – коэрцитивная сила, измеренная со стороны компонента с положительной магнитострикцией. В то же время значения U , измеренные как вдоль, так и поперек направления нагружения, при расположении датчика со стороны составляющей из Ni, имеют достаточно высокую чувствительность во всем интервале приложенных напряжений, а значит, для оценки напряженного состояния двуслойного материала, составляющие которого обладают магнитострикцией разных знаков, предпочтительнее использовать данный параметр в качестве информативного, при этом расположение датчика должно быть со стороны слоя, обладающего отрицательной магнитострикцией.

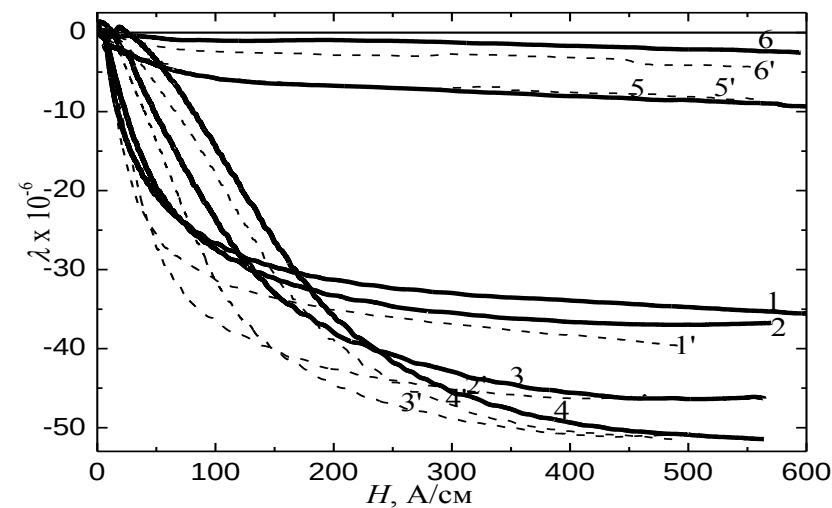


Рис. 3. Полевые зависимости магнитострикции при различных значениях приложенных напряжений. Кривые 1 - 6 – для двуслойного образца, измерения со стороны слоя из Ni, кривая 1 – $\sigma = 0$; 2 – 23; 3 – 68; 4 – 102; 5 – 44; 6 – 85 МПа. Кривые 1' – 6' – для образца из Ni, кривая 1' – $\sigma = 0$; 2' – 25; 3' – 62; 4' – 100; 5' – 50; 6' – 88 МПа

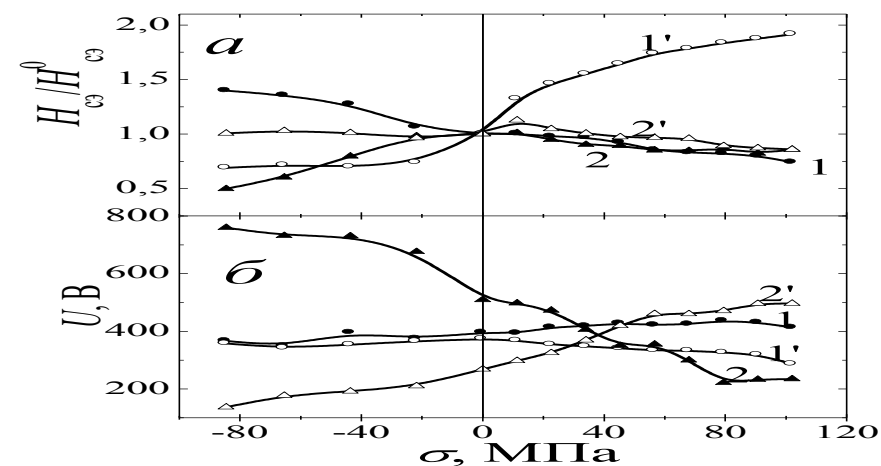


Рис. 4. Зависимости $H_{c3}/H_{c3}^0(\sigma)$ (a) и U (б) от величины приложенных напряжений, полученные в полузамкнутой магнитной цепи, для составного образца. Кривые 1, 2 – измерения вдоль направления оси приложения нагрузки, 1', 2' – поперек. Кривые 1, 1' – измерения со стороны армко-железа, кривые 2, 2' – со стороны никеля

При выполнении настоящей работы было использовано оборудование ЦКП “Пластометрия” при ИМАШ УрО РАН.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы УрО_25П (проекты №№ 12-П-1-1027 и 12-Т-1-1010), междисциплинарного проекта № 12-М-123-2045, гранта РФФИ № 13-01-00732.

E-mail: us@imach.uran.ru

дящие графитовые включения, с увеличением значения макроотклонения и при сжатии зоны трения изменяет электрические свойства. То есть, основной вклад в среднее сопротивление подшипника вносят сближающиеся в зоне трения графитовые включения.

5. Анализ экспериментальных зависимостей параметра $S_R/\bar{R}_{cp}$ от овальности наружного кольца подшипника, работающего в различных условиях смазывания показывает, что характер изменения значения параметра при ухудшении качества сборки опоры качения одинаковый – наблюдается монотонный рост. Однако степень увеличения значения параметра $S_R/\bar{R}_{cp}$ существенно зависит от свойств смазочных материалов. Следовательно, данный параметр может быть использован, как образ технического состояния опоры качения, позволяющий осуществлять прогнозирование её технического состояния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Марков, В. В.** Методы и средства контроля, исследований и анализа смазочных материалов: результаты патентных исследований / В. В. Марков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 5. – С. 121–130.
2. **Подмастерьев, К. В.** Информационные признаки технического состояния узлов трения, используемые при проведении трибомониторинга / К. В. Подмастерьев, В. В. Марков // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы 4-й Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – С. 307–310.
3. **Марков, В. В.** Контроль подшипников качения по параметрам электрического сопротивления / В. В. Марков, В. В. Мишин // Контроль. Диагностика. – 2004. – № 9. – С. 30–41.
4. **Подмастерьев, К. В.** Исследование влияния макроотклонений дорожек качения колец на состояние смазки в подшипнике электрорезистивным методом / К. В. Подмастерьев, В. В. Марков, В. В. Мишин // Трение и износ. – 2005. – Т. 26. – № 5. – С. 546–553.
5. **Подмастерьев, К. В.** Состояние и направления развития электрических методов диагностирования и контроля узлов трения / К. В. Подмастерьев, В. В. Марков // Фундаментальные проблемы техники и технологии «Технология-2012». – Сб. тез. докл. XV Междунар. науч.-техн. конф. – Орёл: Технологический институт им. Н.Н. Поликарпова Госуниверситета-УНПК. – 2012. – С. 380–382.

E-mail: pms35vm@yandex.ru

оценки влияния дефектов сборки подшипникового узла на характер изменения среднего сопротивления (R_{cp}) и среднеквадратического отклонения (S_R) сопротивления подшипника качения при его смазывании смазочными материалами различного состава и вязкости (жидкий, полужидкий, пластичный). В качестве экспериментальной установки использовался стенд с функцией моделирования дефектов сборки подшипникового узла в виде отклонений формы (макроотклонений) дорожек качения подшипника – радиального биения, овальности, огранки. Для сбора и первичной обработки экспериментальных данных использовался первичный преобразователь сопротивления подшипника в электрическое напряжение, плата аналого-цифрового преобразования и плата аналогового ввода ADM212x100M, работающие в составе персонального компьютера [4].

Эксперименты проводились при следующих условиях: новые подшипники предварительно промыты в авиационном керосине и высушены в течение 20 ч; объём смазочного материала $v = 16 \dots 24 \text{ мм}^3$; частота вращения внутреннего кольца испытуемого подшипника качения $\omega = 1500 \text{ мин}^{-1}$; радиальная нагрузка $F_r = 100 \text{ Н}$; угол между вектором F_r и радиусом большой полуоси овальности $\phi = 90^\circ$. Диапазон моделируемой овальности наружного кольца подшипника $Q = 0 \dots 40 \text{ мкм}$. Испытаны смазочные материалы различной вязкости: жидкий смазочный материал – масло трансформаторное, полужидкий – масло трансмиссионное ТАД-17, пластичный – литол-24, пластичный смазочный материал с антифрикционными присадками – графитная смазка.

Анализ результатов исследований позволил сделать ряд выводов.

1. Диагностический параметр «среднее значение активного электрического сопротивления» (R_{cp}) подшипника качения обладает достаточно высокой чувствительностью к отклонениям формы дорожек качения подшипника, и, следовательно, может быть использован для оценки качества сборки опоры качения.

2. Диагностический параметр «среднее значение активного сопротивления» (R_{cp}) подшипника качения позволяет установить различия между свойствами смазочных материалов, и, следовательно, может быть использован для оценки эффективности системы смазывания опоры качения.

3. При увеличении овальности Q в диапазоне значений от 5 до 40 мкм параметр R_{cp} монотонно уменьшается, причем степень уменьшения параметра зависит от типа смазочного материала. Так, например, при использовании масел: трансформаторного масла и масла ТАД-17 параметр R_{cp} уменьшился почти в 2 раза (соответственно, $R_{cp} = 0,5 \dots 0,25 \text{ МОм}$ и $R_{cp} = 0,7 \dots 0,4 \text{ МОм}$), при использовании пластичного смазочного материала Литол-24 – почти в 4 раза ($R_{cp} = 0,6 \dots 0,15 \text{ МОм}$), а при использовании пластичной графитной смазки – более чем в 8 раз ($R_{cp} = 1,3 \dots 0,15 \text{ МОм}$).

4. Наибольшие изменения параметра R_{cp} наблюдаются для графитной смазки. Это можно объяснить тем, что графитная смазка, имеющая прово-

УДК 620

СТРУКТУРА, МЕХАНИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ДВУХСЛОЙНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Э. С. ГОРКУНОВ, А. М. ПОВОЛОЦКАЯ, Е. А. ТУЕВА,
С. М. ЗАДВОРКИН
ФГБУН «ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ УРО РАН»
Екатеринбург, Россия

Широкое распространение многослойных композиционных материалов (КМ) во многих областях промышленности ставит задачу обеспечения контроля напряженно-деформированного состояния изделий из этих материалов. С целью разработки методики диагностики состояния изделий из композиционных материалов, в том числе состояния их компонент, на стадии изготовления и в процессе эксплуатации было проведено исследование изменений, происходящих в фазовом составе, механических и магнитных свойствах сталей Ст3 и 08Х18Н10Т и полученного сваркой взрывом двухслойного КМ «сталь 08Х18Н10Т – сталь Ст3», после накопительной холодной прокатки с различной степенью деформации.

Листовые заготовки из сталей Ст3 и 08Х18Н10Т, а также изготовленный из них композиционный материал были прокатаны с различной степенью деформации $\epsilon_{пр}$. Для стали Ст3 $\epsilon_{пр} = 0; 0,11; 0,20; 0,34; 0,49; 0,63$, для стали 08Х18Н10Т $\epsilon_{пр} = 0; 0,19; 0,27; 0,36; 0,45; 0,57$. Величина $\epsilon_{пр}$ для образцов из КМ: $\epsilon_{пр} = 0; 0,14; 0,28; 0,40; 0,56; 0,62$. Длинная ось образцов совпадала с направлением прокатки.

На рис. 1 (а, б) приведены микроструктуры исследованного КМ. Граница раздела двух материалов представляет собой волнообразную поверхность. По мере увеличения степени деформации прокаткой происходит уменьшение волнообразности границы, что приводит к увеличению прочности материала в зоне соединения компонент. Об этом же свидетельствуют результаты измерения твердости обеих компонент КМ, представленные на рис. 1, в. Видно, что с увеличением степени деформации прокаткой твердость материала, являющаяся одним из показателей, характеризующих прочность, растет, причем твердость в районе шва выше, чем на внешних поверхностях образца.

Измерение магнитных характеристик проводили как в замкнутой магнитной цепи по схеме пермеаметра, так и с использованием накладных преобразователей в полужамкнутой магнитной цепи.

У образцов из стали Ст3 с увеличением степени деформации прокаткой установлена монотонная зависимость таких магнитных характеристик, как коэрцитивная сила, максимальная магнитная проницаемость, число скачков Баркгаузена, а также тангенциальная составляющая вектора магнитной индукции поля рассеяния образцов. Чувствительность этих маг-

нитных характеристик позволяет использовать их в качестве информативных параметров при оценке изменений деформированного состояния при прокатке в изделиях из низкоуглеродистых сталей.

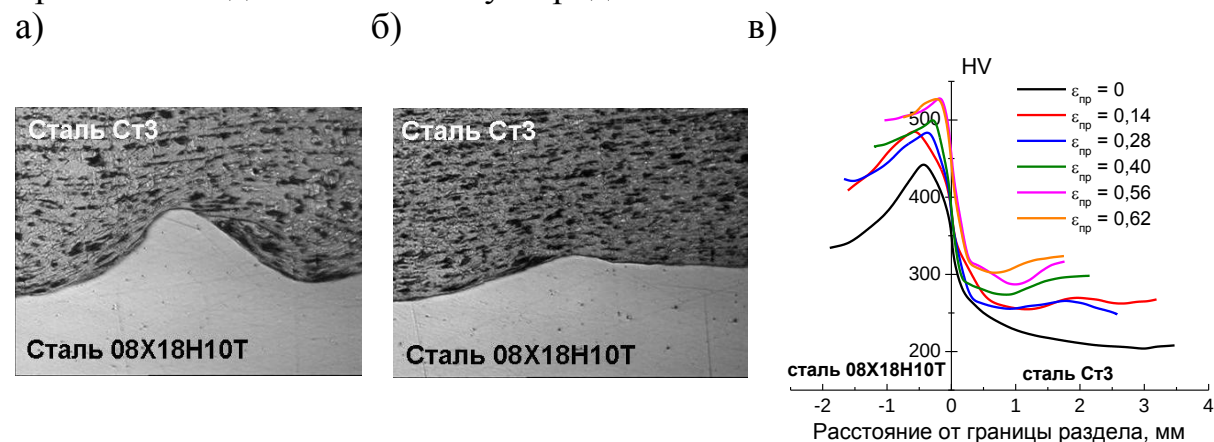


Рис. 1. Структура КМ «сталь 08X18N10Т – сталь Ст3», полученной сваркой взрывом и последующей холодной прокаткой со степенью деформации 0,28 (а) и 0,62 (б). Увеличение $\times 300$. Распределение твердости по сечению КМ при различных степенях деформации прокаткой (в)

Для оценки структурных изменений и деформированного состояния изделий из коррозионностойкой стали аустенитного класса 08X18N10T после холодной прокатки могут быть использованы значения максимальной намагниченности, максимальной магнитной проницаемости, а также среднеквадратичные значения напряжения магнитных шумов Баркгаузена, монотонно изменяющиеся с ростом степени деформации.

Коэрцитивная сила композиционного материала «сталь 08X18N10Т – сталь Ст3» при увеличении $\epsilon_{пр}$ ведет себя однозначно, что дает возможность использовать ее для оценки степени деформации подобных композиционных материалов.

Показано, что результаты измерений магнитных характеристик композиционного материала с применением накладных магнитных устройств определенных геометрических размеров дают возможность получения информации о состоянии той компоненты слоистого материала, со стороны которой размещен преобразователь.

Полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{диф}(H)$ композита и его компонент при различных степенях деформации прокаткой представлены на рис. 2. Для образцов из стали Ст3 и композиционного материала в недеформированном состоянии на $\mu_{диф}(H)$ (рис. 2, а) наблюдается по одному пику, соответствующему ферриту в стали Ст3. Магнитная проницаемость стали 08X18N10T близка к 1. С увеличением степени деформации прокаткой (рис. 2, б) появляются изменения в зависимостях $\mu_{диф}(H)$ для всех трех исследованных материалов. Высота пика на полевой зависимости стали Ст3 уменьшается практически в 3 раза. На

УДК 620.179.1.082.7

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА И ДЕФЕКТОВ СБОРКИ ОПОРЫ КАЧЕНИЯ ПО ЭЛЕКТРОРЕЗИСТИВНЫМ ДИАГНОСТИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

В. В. МАРКОВ
ФГБОУ ВПО «ГОСУНИВЕРСИТЕТ-УНПК»
Орёл, Россия

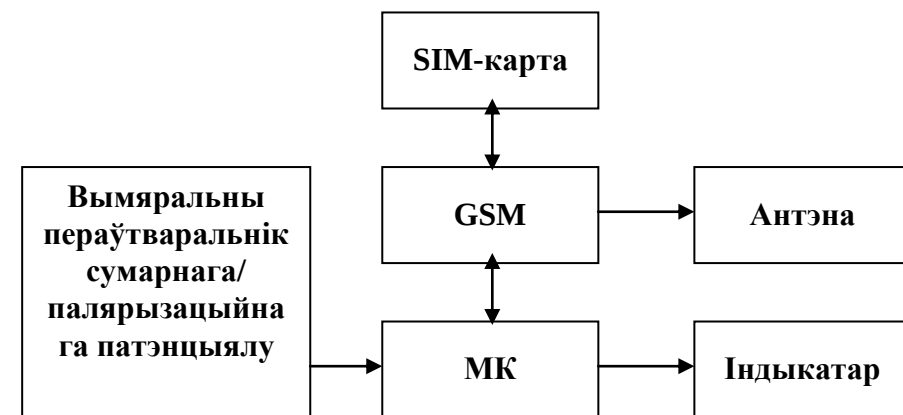
Опоры качения машин относятся к категории элементов, испытывающих наиболее тяжёлые режимы работы при эксплуатации – радиальную и осевую нагрузку, высокие скорости вращения, удары, сопровождающиеся значительной температурой в зонах трения и риском работы в условиях «масляного голодания». Поэтому при проведении приёмочных испытаний машин, после их изготовления или ремонта, необходимо осуществлять техническое диагностирование входящих в их состав опор качения в реальных условиях эксплуатации.

В настоящее время известно достаточно большое количество методов технического диагностирования опор качения: механические, кинематические, вибрационные, акустические, электрические, тепловые и другие. Принимая очевидные достоинства всех известных методов диагностирования опор качения, отметим, что одной из наиболее перспективных является группа электрических методов, в частности, электрорезистивный метод диагностирования, сущность которого заключается в оценке технического состояния объекта по параметрам функции его активного электрического сопротивления. Основными преимуществами электрорезистивного метода являются: приспособленность для неразрушающей диагностики опоры качения, возможность прогнозирования возникновения дефектов поверхностей трения на ранних стадиях их зарождения, широкие функциональные возможности (диагностирование различных элементов триботехнической системы и дефектов разного рода), безинерционность, простота алгоритмов диагностирования и диагностической аппаратуры [1, 2].

Целью данной работы является анализ характера и степени влияния показателей качества сборки и эффективности системы смазывания опоры качения на электрорезистивные диагностические параметры: среднее арифметическое значение активного сопротивления подшипника качения; среднеквадратическое отклонение активного сопротивления подшипника качения; отношение среднеквадратического отклонения к среднему арифметическому значению. В основу экспериментальных исследований заложены основные теоретические положения и алгоритмы диагностирования электрорезистивного метода контроля подшипников качения [3–5].

Для достижения поставленной цели выполнены экспериментальные исследования. В процессе проведения экспериментов решалась задача

призначена для ўсталёўкі без змены канструкцыі КВП і разлічана на вымярэнне сумарнага і (або) палярнага патэнцыялу [5]. Кіруючы мікракантролер (МК) апрацоўвае значэнні $U_{сум}$ ($U_{нал}$), назапашвае іх на SIM-карце і праз GSM-канал адсылае на сервер для фіксацыі ў адзінай базе дадзеных, а таксама на цэнтральны працэсар – для магчымасці рэалізацыі адваротнай сувязі (падтрымання ахоўнага патэнцыялу на зададзеным узроўні).



Малюнак 2. Сістэма маніторынгу ахоўнага патэнцыялу для нафтаправода з выкарыстаннем тэлекамунацыйнага канала

Сілкаванне сістэмы аўтаномнае, ад акумулятарнай батарэі, ёмістасць батарэі выбіраецца з умовы працаздольнасці прылады на працягу 7-10 сутак. GSM-модуль працуе з дапамогай АТ-камад паводле пратакола USART. Для зручнасці распрацавана праграма забеспячэнне сервера з дадзенымі, якое дазваляе прааналізаваць вынікі вымярэнняў у выглядзе графіка. Сістэма можа ўжывацца для аналізу якасці абароны падземных збудаванняў, а ў перспектыве можа быць уключана ў склад аўтаматычных станцый катоднай абароны.

СПІС ЛІТАРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 51164-98 «Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии». – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998. – 42 с.
2. ГОСТ 9.602-2005 «Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии» – М.: Стандартинформ, 2006. – 59 с.
3. Защита трубопроводов от коррозии: в 2 т. / Ф. М. Мустафин [и др.] – СПб.: Недра, 2007. – Т. 2.
4. Мельнікаў, А. В. Імпульсны стабілізатар аноднага току для станцый катоднай абароны з кантролем ахоўнага патэнцыялу / А. В. Мельнікаў // материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и молодых ученых, Гомель, 25–26 апр. 2013 г. – ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2013. – С. 236–238.

E-mail: kyuri73@tut.by

кривой $\mu_{диф}(H)$ для образцов из стали 08X18H10T, прокатанной до $\epsilon_{пр} = 0,36$, начинается рост пика, соответствующего формированию при прокатке мартенсита деформации. Пик локализуется в полях 20–25 А/см. Причем на полевой зависимости дифференциальной магнитной проницаемости КМ в этих же полях происходит формирование второго пика, что свидетельствует о протекании фазового превращения в КМ в слое из стали 08X18H10T.

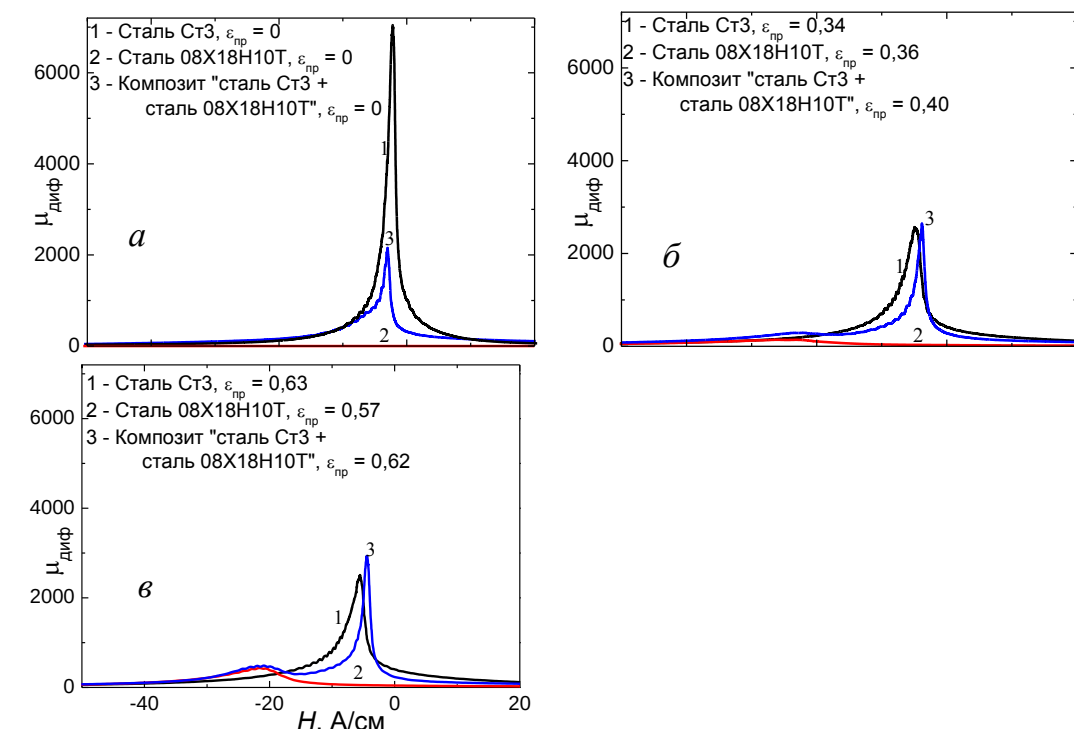


Рис. 2. Полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости КМ «сталь 08X18H10T – сталь Ст3» и его отдельных компонент, построенные для различных степеней деформации прокаткой

На рис. 2, в представлены кривые $\mu_{диф}(H)$ для всех трех материалов, прокатанных на максимальные степени деформации. Как видно, на кривой $\mu_{диф}(H)$ для композита, прокатанного с $\epsilon_{пр} = 0,62$, наблюдается два четких пика, соответствующие двум ферромагнитным фазам – ферриту в стали Ст3 и мартенситу в стали 08X18H10T. При увеличении $\epsilon_{пр}$ высота пика, соответствующего стали 08X18H10T, увеличивается с ростом содержания α' -фазы. Таким образом, высота и положение пиков на полевой зависимости дифференциальной магнитной проницаемости композита, соответствующие двум ферромагнитным фазам – ферриту в стали Ст3 и мартенситу деформации в стали 08X18H10T, могут служить параметрами при оценке степени деформации прокаткой как КМ в целом, так и его отдельных компонент.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 11-01-12126-офи-м-2011) и Программы Президиума РАН № 25.

В. И. ЗУБКО, Д. В. ЗУБКО, Г. Н. СИЦКО
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Минск, Беларусь

Разработка оперативных методов контроля и диагностики диэлектрических свойств материалов электротехнического назначения обусловлена необходимостью их тестирования на соответствие диэлектрических показателей (относительной диэлектрической проницаемости – ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь – $\tan \delta$) нормам, регламентированным соответствующими стандартами.

На рис. 1 представлена фотография малогабаритной установки для оперативного контроля комплекса диэлектрических показателей пластинчатых изоляционных материалов электротехнического назначения в диапазоне частот электрического поля 50 Гц – 1 МГц.



Рис. 1. Малогабаритная установка для контроля комплекса диэлектрических показателей пластинчатых изоляционных материалов электротехнического назначения в диапазоне частот 50 Гц–1 МГц

Малогабаритная установка включает в себя созданный высокочувствительный преобразователь, который представляет собой микрометрическое устройство со встроенным микровинтом, соединенным с подвижным дисковым электродом, симметрично расположенным с неподвижным электродом, рабочие поверхности которых отшлифованы, отполированы, хромированы и притерты друг к другу [1].

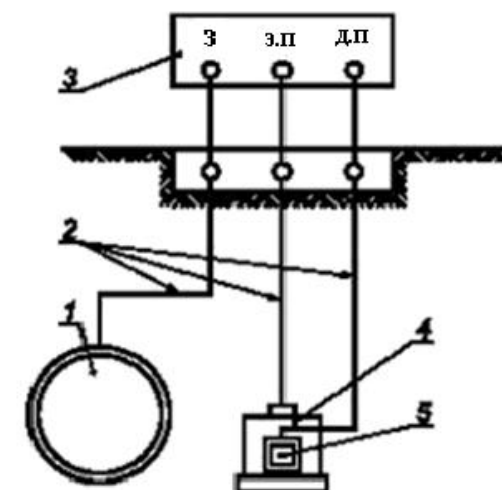
Высокочувствительный преобразователь по сравнению с существующими аналогами обладает следующими преимуществами:

супрациўленні, куды ўваходзіць супрациўленне электраліта ў порах ізаляцыі і ўчастак грунту паміж нафтаправодам і вымяральным электродам. Палярэзацыйны складнік ($U_{нал}$) – карыснае падзенне напружання на палярэзацыйным супрациўленні метал-электраліт. Вылучэнне палярэзацыйнага складніка і выключэнне амічнага мае вялікае практычнае значэнне. І гэта звязана, перш за ўсё, з надзейнасцю абароны.

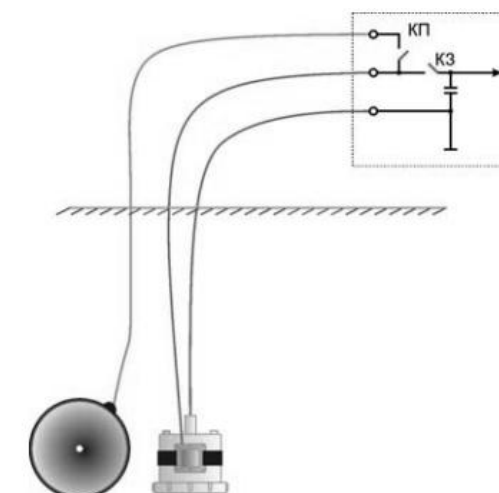
Існуе два метады вымярэння патэнцыялаў: вымярэнне сумарнага патэнцыялу і вымярэнне палярэзацыйнага патэнцыялу метадам палярэзацыі датчыка патэнцыялу.

Схема вымярэння палярэзацыйнага патэнцыялу прадстаўлена на малюнку 1.

а)



б)



Малюнак 1. Схема вымярэння палярэзацыйных патэнцыялаў на стацыянарных кантрольна-вымяральных пунктах: 1 – нафтаправод; 2 – кантрольныя праваднікі; 3 – прыбор з убудаваным перапыняльнікам току палярэзацыі датчыка з клемамі: «з» – для падлучэння збудавання; «э.п.» – электрода параўнання; «д.п.» – датчыка патэнцыялу; 4 – стацыянарны медна-сульфатны электрод параўнання; 5 – датчык патэнцыялу (а). Адна з традыцыйных схем вузла выдзялення палярэзацыйнага патэнцыялу на аснове двух ключоў: КП – ключ палярэзацыі, КЗ – ключ зарада (а)

Кіраванне ключамі, паказанымі на малюнку 1, б, ажыццяўляе схема, пабудаваная на элементах логікі, або кантролер па адмысловай праграме. Алгарытм кіравання ключамі наступны: замыкаецца КП і зарад трубаправода перадаецца датчыку патэнцыяла, датчык палярэзуецца, затым КП размыкаецца. Праз пэўны прамежак часу замыкаецца КЗ і зарад датчыка перадаецца кандэнсатару. За некаторую колькасць тактаў датчык палярэзуецца, а на кандэнсатары назапашваецца зарад, роўны палярэзацыйнаму патэнцыялу. Далей патэнцыял паступае на вольтметр з вялікім уваходным супрациўленнем.

Сістэма маніторынгу ахоўнага патэнцыялу для нафтаправода з выкарыстаннем тэлекамунацыйнага канала, паказаная на малюнку 2,

УДК 621.38: 658.58
СІСТЭМА МАНІТОРЫНГУ АХОЎНАГА ПАТЭНЦЫЯЛУ ДЛЯ
НАФТАПРАВОДА З ВЫКАРЫСТАННЕМ ТЭЛЕКАМУНІКАЦЫЙНАГА
КАНАЛА

Ю. В. КРЫШНЁЎ, Л. А. ЗАХАРАНКА, А. В. МЕЛЬНІКАЎ
УА «ГОМЕЛЬСКІ ДЗЯРЖАЎНЫ ТЭХНІЧНЫ ЎНІВЕРСІТЭТ
імя П. В. Сухого»
Гомель, Беларусь

Карозія падземных нафтаправодаў з'яўляецца адной з асноўных прычын іх разгерметызацыі з прычыны ўтварэння каверн, расколін і парываў. Электрахімічная абарона падземных металічных нафтаправодаў можа быць ажыццёўлена метадам катоднай палярызацыі, г. зн. шляхам зрушэння патэнцыялу ад яго стацыянарнага значэння ў бок адмоўных значэнняў да велічыні ахоўнага патэнцыялу, пры якім хуткасць растварэння металу не перавышае некаторай зададзенай велічыні. У працэсе наладкі і эксплуатацыі электрахімічнай абароны патрабуецца кантроль электроднага патэнцыялу нафтаправода.

Вымярэнні ахоўных патэнцыялаў ажыццяўляюцца ў кантрольна-вымяральных пунктах (КВП). Каб вымераць патэнцыял, патрабуецца электрод, адносна якога будзе ажыццяўляцца яго вымярэнне [1, 4].

У якасці такіх электродаў выкарыстоўваюцца медна-сульфатныя электроды параўнання [1–3]. Яны прызначаныя для выкарыстання ў сістэмах электрахімічнай абароны нафтаправодаў ад карозіі, усталёўваюцца ў грунт на глыбіню кладкі трубаправода (ніжэй глыбіні прамязання глебы) і прымяняюцца для вымярэння палярызацыйнага патэнцыялу і патэнцыялу падземнага збудавання шляхам стварэння электралітычнага кантакту з грунтам. Канструктыўна медна-сульфатны электрод параўнання складаецца з датчыка патэнцыялу (меднага стрыжня) і вымяральнага электрода [4].

Вымеранае з дапамогай прыбораў значэнне ахоўнага патэнцыялу складаецца з сумы патэнцыялаў (сумарны патэнцыял):

$$U_{\text{сум}} = U_{\text{нат}} + U_{\text{нал}} + U_{\text{ам}}, \tag{1}$$

дзе: $U_{\text{нат}}$ – натуральны патэнцыял збудавання; $U_{\text{нал}}$ – палярызацыйны складнік (напружанне на палярызаваным пласце металічнай паверхні); $U_{\text{ам}}$ – амічны складнік – з'яўляецца непажаданай хібнасцю, якую пры вымярэннях варта выключыць або ўлічыць.

Натуральны патэнцыял $U_{\text{нат}}$ – патэнцыял металічнага збудавання, вымераны адносна электрода параўнання пры адсутнасці блукаючых токаў палярызацыі ад знешніх крыніц току. Пры адсутнасці дадзеных $U_{\text{нат}}$ прымаюць роўным (адносна медна-сульфатнага электрода параўнання): мінус 0,7 В – для сталі і алюмінія; мінус 0,48 В – для свінца.

Амічны складнік зрушэння патэнцыялу ($U_{\text{ам}}$) – гэта непазбежнае і шкоднае падзенне напружання, выкліканае токамі абароны на некаторым

а) позволяе получать информацию о комплексе диэлектрических показателей пластинчатых электроизоляционных материалов электротехнического назначения в диапазоне частот электрического поля 50–1 МГц;

б) обеспечивает однородное электрическое поле в объеме контролируемого пластинчатого электроизоляционного материала в диапазоне частот электрического поля 50–1 МГц;

г) обладает малой величиной диэлектрических потерь – $1,8 \cdot 10^{-5}$.

Разработанная методика позволяет проводить оперативный контроль ε и $tg\delta$ пластинчатых электроизоляционных материалов электротехнического назначения в диапазоне частот электрического поля 50–1 МГц.

В табл. 1 представлены результаты контроля ε и $tg\delta$ пластинчатых электроизоляционных материалов электротехнического назначения.

Табл. 1. Диэлектрические показатели пластинчатых изоляционных пресс-материалов электротехнического назначения

Электроизоляционный пресс-материал ГСП-8		
Диэлектрический показатель	Определяемый показатель	По ГОСТ 17478-95
Относительная диэлектрическая проницаемость	5,420	Не более 7,0
Тангенс угла диэлектрических потерь	0,021	Не более 0,04
Электроизоляционный материал АГ-4В		
Относительная диэлектрическая проницаемость	8,65	По ГОСТ 20437-89
		Не более 7,0
Тангенс угла диэлектрических потерь	0,05	Не более 0,04
Дозирующий стекловолоконный пресс-материал ДСВ-20		
Относительная диэлектрическая проницаемость	6,65	По ГОСТ 17478-89
		Не более 7,0 – 8,0
Тангенс угла диэлектрических потерь	0,020	Не более 0,05
Гранулированный стеклотекстолит волоконный пресс-материал ГСП-8		
Относительная диэлектрическая проницаемость	6,6	По ГОСТ 17478-95
		Не более 7,0 – 8,0
Тангенс угла диэлектрических потерь	0,025	Не более 0,04

Для контроля электроизоляционных пресс-материалов на диэлектрические показатели было поставлено десять образцов. Диагностический

контроль диэлектрических показателей (относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь) электроизоляционных пресс-материалов проводился на частоте электрического поля 1 МГц. Для каждого образца было проведено по пять параллельных опытов. В таблице 1 представлены средние значения диэлектрических показателей из пяти параллельных опытов. Точность определения диэлектрических показателей образцов составляет $\pm 1,2\%$.

На основе анализа результатов установлено, что в пяти контролируемых образцах электроизоляционных пресс-материалов АГ-4В из одной партии – относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь получены завышенные диэлектрические показатели. В пяти контролируемых образцах электроизоляционных пресс-материалов ГСП-8 из разных партий диэлектрические показатели соответствуют нормам, регламентированным соответствующими стандартами. Все остальные образцы электроизоляционных пресс-материалов, поставленных для контроля диэлектрических показателей соответствуют нормам.

Таким образом, методика и оборудование, которыми располагает НИЛ диэлектрической спектроскопии физического факультета БГУ, в дальнейшем могут быть использованы для оперативного контроля диэлектрических показателей электроизоляционных пресс-материалов на соответствие нормам, регламентированным соответствующими стандартами. Малогабаритная установка позволяет проводить диагностический контроль и своевременно выявлять на соответствие нормам диэлектрических показателей электроизоляционных пресс-материалов, применяемых в высоковольтных электрических и радиотехнических устройствах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 9001 Респ. Беларусь, МКИ⁸ G 01 R 27/26. Устройство для измерения электрических свойств полимерных композиций / Д. В. Зубко, В. И. Зубко; заявитель и патентообладатель «Белорусский госуд. ун-т». – u20120669; заявл. 10.07.12; опубл. 28.02.13 // Афіцыйны бюлетэнь /Нац. Цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 1.– С. 201.

E-mail: Zubko@bsu.by

проверки количество негерметичных банок превышает 0,1 %, то закаточную машину останавливают и перенастраивают закаточный механизм. Следовательно, на перерабатывающих предприятиях предусмотрен несколько прямой контроль готовой герметизированной продукции, а мониторинг качественной работы технологического оборудования для ее производства.

В соответствии с концепцией неразрушающего контроля [4] герметичность малогабаритных изделий в замкнутой оболочке массового производства должна контролироваться в ритме производства, а установки для контроля герметичности, являющиеся частью комплекса технологического оборудования, должны быть высокопроизводительными и обеспечивать надежную отбраковку негерметичных изделий.

Поэтому задачей дальнейших исследований является совершенствование существующих методов контроля герметичности закупоренных консервных банок с целью создания автоматизированной установки контроля герметичности, которая:

а) позволила бы минимизировать недостатки существующих методов контроля герметичности и исключить влияние человеческого фактора на результат контроля;

б) должна быть неотъемлемой частью технологической линии производства консервов, поскольку продолжительность процесса с момента закатки до начала стерилизации не должна превышать 30 мин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Загальні технології харчових виробництв: підруч / В. А. Домарецький [і др.]. – Київ : Університет «Україна», 2010. – 814 с.

2. Посудін, Ю. І. Методи неруйнівної оцінки якості та безпеки сільськогосподарських і харчових продуктів: навчальний посібник / Ю. І. Посудін. – Київ : Арістей, 2005. – 408 с.

3. Інструкція про порядок санітарно-технічного контролю консервів на виробничих підприємствах, оптових базах, в роздрібній торгівлі та на підприємствах громадського харчування І 4.4.4.077-2001/ Затверджено Постановою Головного державного санітарного лікаря України 07.11.2001 N 140. – 43 с.

4. Неразрушающий контроль: справочник : в 7 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2003. – Т. 2. – 688 с.

E-mail: zavalnyukinna@rambler.ru

УДК 620.165.29: 664.93+664.8.036.5

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ
ГЕРМЕТИЧНОСТИ ЗАКУПОРЕННЫХ КОНСЕРВНЫХ БАНОК

И. П. ЗАВАЛЬНЮК

«ХЕРСОНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Херсон, Украина

Согласно технологии пищевых продуктов [1] консервы – это герметически укупоренные и стерилизованные продукты растительного или животного происхождения, уложенные в жестяные или стеклянные банки и предназначенные для длительного хранения. Одним из факторов, определяющих продолжительность хранения, является качество герметизации.

Банки, наполненные и закатанные на любом типе машин, исключая вакуум-закаточные, проверяют на герметичность, что предусмотрено на технологических линиях для фасовки консервов, поскольку плохо закатанные банки при стерилизации в автоклаве начинают подтекать.

Герметичность банок в производственных условиях проверяют следующими методами [2]:

а) визуально путем внешнего осмотра, проводимого оператором непосредственно у конвейера, осматривая закаточный шов. Однако так можно обнаружить только явный брак;

б) в водяной контрольной ванне, окрашенной изнутри белой краской, хорошо освещенной и наполненной горячей водой (80–90 °С). В этой ванне движутся в течение 1–2 мин закатанные банки. У плохо герметизированных банок появляются воздушные пузырьки вследствие расширения воздуха под действием нагревания. При движении в ванне одновременно содержимое банок подогревается и они моются. Возможность такого метода ограничивается конструкцией, формой и материалом изделия, помещаемого в емкость с водой;

в) путем введения в банку перед заполнением 5–6 капель серного эфира. После закатки ее подогревают в воде до 80–85 °С, герметичность швов проверяют по появлению пузырьков воздуха и паров эфира. Однако применение серного эфира на предприятиях пищевой промышленности влечет нарушение санитарно-технической безопасности производства и работающего персонала;

г) манометрические камерные методы контроля, несмотря на большую степень совершенности и точности, обладают вероятностью получения ошибочного результата, так как при контроле негерметичного изделия в нем также повысится давление, причем до заданной величины и в процессе контрольной выдержки изменения давления в камере не произойдет.

Согласно [3] качество работы закаточных машин проверяют не менее чем трижды за смену для каждой пары роликов. Если в течение часа

УДК 533.9.08;535.33;543.42

КОНТРОЛЬ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА КАЛИЕВЫХ РУД
МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНО-ИСКРОВОЙ ЭМИССИОННОЙ
СПЕКТРОСКОПИИ

К. Ю. КАЦАЛАП, М. В. БЕЛЬКОВ, А. Г. КАРОЗА
ГНУ «ИНСТИТУТ ФИЗИКИ НАН Беларуси»
Минск, Беларусь

Добыча и переработка калийсодержащих руд в промышленных масштабах нуждается в эффективных средствах локального контроля элементного состава руды. Содержание в руде главного компонента – хлорида калия зависит от месторождения и колеблется в пределах от 22 % до 30 %, нерастворимого остатка – 4–12 % (рудники ОАО «Беларуськалий»). От количественного состава руды зависит количество и соотношение реагентов, необходимых в процессе обогащения. Круглосуточное поступление руды на обогатительные комплексы со скоростью порядка 1000 тонн/час требует эффективных и быстродействующих измерительных средств. Подобными качествами обладают методы лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии (ЛИЭС). Лазерное воздействие на материалы с целью испарения материала образца и возбуждения его спектров излучения получает все более широкое применение в эмиссионном спектральном анализе элементного состава веществ [1–4]. Возбуждение эмиссионного спектра исследуемого вещества в этом случае осуществляется за счет энергии короткого сфокусированного лазерного импульса. Благодаря его воздействию на исследуемую поверхность, возникает эрозионная лазерная плазма, содержащая вещество данного образца. Анализ излучения лазерной искры позволяет выделить спектральные линии элементов, содержащихся в образце. По интенсивности спектральных линий, принадлежащим атомам (или ионам) различных химических элементов, определяется содержание элементов в образце.

Показана возможность измерения содержания калия и других элементов в образцах, соответствующих породе, добываемой на рудниках ОАО «Беларуськалий», методами ЛИЭС. Получены пределы обнаружения различных химических элементов. Измерения проведены с использованием лазерного спектрального микроанализатора. Внешний вид и блок-схема установки приведены на рис. 1. Установка включает в себя частотный двухимпульсный лазер (1) на алюмоиттриевом гранате с модуляцией добротности (длина волны генерации – 1064 нм) с диодной накачкой, оптический блок, систему регистрации на основе ПЗС-линейки (2), перестраиваемый спектрограф MS2004 (3) и ПК с программным обеспечением для управления процессом регистрации и обработки данных (4).

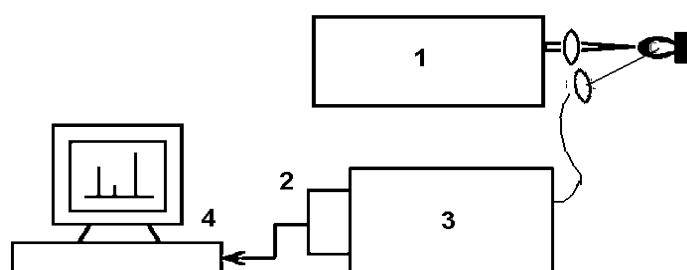


Рис. 1. Внешний вид и блок-схема лазерного спектрального анализатора

Поскольку стандартные образцы представляют собой сыпучий материал, то перед измерением материал был спрессован в таблетки массой 0,2–0,3 г.

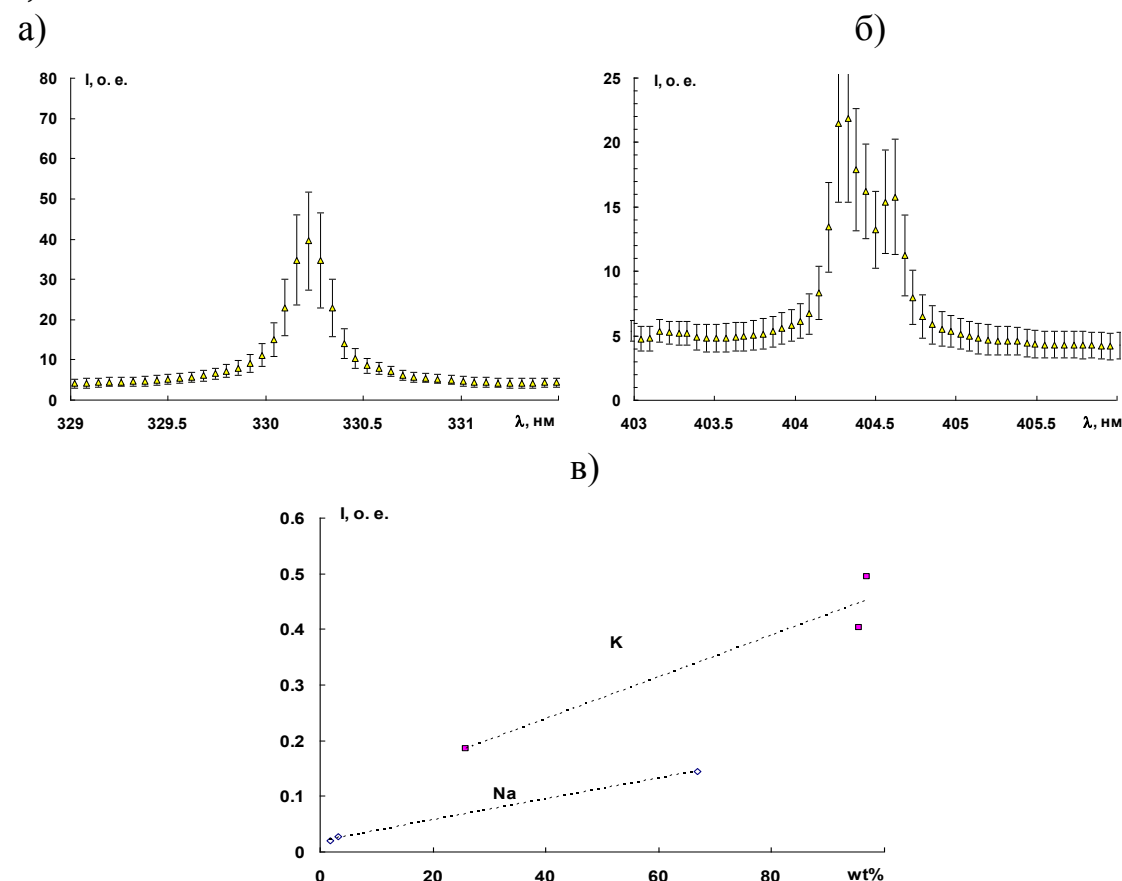


Рис. 2. Эмиссионные спектры в области аналитических линий Na (а), К (б) и калибровочные графики (в)

- регистрация состояния поверхности в широком диапазоне окружающих газовых сред как при сухом, так и при граничном трении;
- элементы системы не должны вносить никаких возмущений в процесс трения, то есть должны быть непрерывными и бесконтактными;
- система должна иметь простую техническую реализацию.

Одним из немногих методов для оценки и диагностики трибологической поверхности, удовлетворяющим изложенным выше требованиям, является метод контактной разности потенциалов, также известный как метод Кельвина, основанный на регистрации интегрального изменения работы выхода электрона с поверхности металла или плотности электростатического потенциала на поверхности диэлектрика. Также метод контактной разности потенциалов является в настоящее время единственным чувствительным к дефектам методом, позволяющим контролировать в процессе трения только одну из сопряженных поверхностей. Упрощенная модификация данного метода, использующая невибрирующий конденсатор [1], может быть использована при построении бесконтактных встраиваемых датчиков мониторинга поверхностей в реальных узлах трения. Некоторые методы, наиболее применимые к диагностике и анализу систем трения, описаны в работе [2].

Следует также отметить, что хотя данный метод рассматривался в работе применительно к трибологической поверхности, он может быть успешно применен для решения широкого ряда задач в области исследования поверхностей, контроля технологических процессов обработки материалов, включая нанесение различных типов покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Non-vibrating capacitance probe for wear monitoring : pat. 5974869 US, IPC7 G 01 R 1/067, G 01 R 1/07, G 01 R 027/26 / S. Danyluk, A. Zharin, E. Zanoria, L. Reid, K. Hamall ; assignee Georgia Tech Research Corp. – № 971101 ; date of pat. 02.11.1999 // World Intellectual Property Organization. – 2014. – Mode of access : <http://www.wipo.int> – Date of access : 01.05.2014.

2. **Zharin, A. L.** Contact Potential Deference Techniques as Probing Tools in Tribology and Surface Mapping / A.L. Zharin // Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology (ed. by B. Bhushan). – Springer Heidelberg Dordrecht London New York – P. 687–720.

E-mail: nilpt@tut.by

А. Л. ЖАРИН, К. В. ПАНТЕЛЕЕВ, А. И. СВИСТУН
«БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Минск, Беларусь

Повышение надежности машин и механизмов является одной из важнейших задач обеспечения технико-экономической эффективности производства. Решение задачи обеспечения надежной работоспособности пар сопряжения может быть реализовано путем организации системы контроля и управления сроком службы реальных узлов трения. Такая система, с одной стороны, позволяет максимально использовать внутренний резерв элементов ответственных узлов, если их остаточный ресурс превышает нормативный срок эксплуатации, а, с другой стороны, препятствует эксплуатации потенциально опасной техники, если назначенный ресурс не выработан полностью.

Целью работы является модификация конденсаторного метода Кельвина для построения бесконтактных встраиваемых датчиков диагностики состояния узлов трения в процессе эксплуатации.

Трибологические поверхности имеют ряд характерных особенностей, которые следует принимать во внимание при выборе адекватных методов диагностики их работоспособности. С учетом неоднородности технических поверхностей целесообразно применение методов, обеспечивающих характеристику объектов трения по интегральному участку поверхности. Кроме того, современные тенденции в исследовании трибологических поверхностей состоят в исследовании кинетики процессов, протекающих в тонких поверхностных слоях (порядка моноатомного слоя). Следует также отметить, что большинство современных методов диагностики состояния работающей пары сопряжения дают суммарную информацию о поведении обеих поверхностей (например, методы трибо-э.д.с., электросопротивление контакта, момента трения, акустической эмиссии и т.д.), когда интерес все же представляет поведение каждой поверхности в отдельности.

На основании сказанного выше, основными требованиями к системам непрерывного мониторинга состояния поверхности материалов реальных узлов трения являются следующие:

- регистрация свойств моноатомного поверхностного слоя;
- характеристика интегрального участка поверхности;
- регистрация свойств поверхности, непосредственно находящейся под воздействием сил трения;
- регистрация свойств каждой из поверхностей в отдельности;

На рис. 2 представлены контуры атомных линий Na I 330 нм и K I 404 нм (а, б), по интенсивности которых построены градуировочные графики, отражающие зависимость интенсивности от концентрации Na и K (в).

Локальность воздействия лазерного излучения (размер эрозионных кратеров 0,5 мм) и неоднородность, как состава, так и структуры породы обуславливает необходимость сбора данных для достоверной статистики.

На каждом образце выбрано по 5 точек, для каждой из которых проводилось по 10 измерений спектральной интенсивности излучения возбуждаемой эрозионной плазмы (одному измерению соответствует 20 сдвоенных импульсов лазера). Точки выбраны таким образом, чтобы условия возбуждения (плотность мощности на поверхности образца) сохранялись от точки к точке. На основании измерений образцов с известным количественным составом, получены пределы обнаружения различных соединений, входящих в состав руд (табл. 1).

Табл. 1. Пределы обнаружения химических соединений в калий-содержащих рудах

Соединение	wt%
KCl	5
NaCl	1,5
CaCl ₂ +CaSO ₄ +Ca...	0,05

Результаты и перспективы:

– показана принципиальная возможность элементного анализа калий-содержащих пород методами атомной эмиссионной спектроскопии с лазерным возбуждением образца;

– применение оптического блока с соосными направлениями возбуждающего луча и линии наблюдения, длиннофокусным объективом и системой автофокусировки луча позволит регистрировать спектры излучения лазерной плазмы безотносительно к уровню поверхности образцов породы;

– применение твердотельного лазера с диодной накачкой позволит создать автоматизированную систему для контроля элементного состава калий-содержащих пород в реальном режиме времени

Стандартные образцы предоставлены НПО «Пассат».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Radziemski, L. J.** From LASER to LIBS, the path of technology development /L.J. Radziemski // Spectrochim. Acta, Part B. – V. 57. – 2002. – P. 1109–1113.
2. **Omenetto, N.** Role of lasers in analytical atomic spectroscopy: where, when and why / N. Omenetto // J. Anal. At. Spectrom. – V. 13. – 1998. – P. 385–399.
3. Comparing several atomic spectrometric methods to the super stars: special emphasis on laser induced breakdown spectrometry, LIBS, a future super star / J. D. Winefordner [et al.] // J. Anal. At. Spectrom. – V. 19. – 2004. – P. 1061–1083.
4. **Янковский, А. А.** Физические и методические основы атомного спектрального анализа с применением лазеров : дис...д-ра физ.-мат. наук / Янковский. А. А. – Минск, ИФ АНБССР. – 1985. – 351 с.

В. В. КИРИС, С. Н. РАЙКОВ, М. В. БЕЛЬКОВ
ГНУ «ИНСТИТУТ ФИЗИКИ НАН Беларуси»
Минск, Беларусь

Опыт эксплуатации бетонных сооружений показал, что даже небольшие отклонения от технологического регламента, а также неправильная оценка или последующее ухудшение условий окружающей среды могут привести к значительным повреждениям бетонных конструкций [1].

В частности, Европейской комиссией по железобетону были разработаны новые нормы эксплуатации бетонных конструкций (стандарт ENV 206). Согласно данному стандарту, для нормальной эксплуатации строительных конструкций из железобетона необходимо, чтобы в течение всего срока службы арматура (особенно напрягаемая) оставалась в защитной щелочной среде, пассивирующей коррозию, и не подвергалась воздействию соединений ускоряющих коррозию (хлориды, сульфаты, карбонизация цементного камня).

Определение данных элементов в бетоне до последнего времени являлось весьма трудоемким и осуществлялось методами мокрой химии с применением агрессивных кислот для растворения цементного камня.

Лазерный атомно-эмиссионный спектральный анализ (ЛАЭС) является одним из наиболее универсальных и гибких методов определения элементного состава объектов разнообразного происхождения. Данный метод не требует сложной пробоподготовки и позволяет одновременно анализировать содержание различных химических элементов.

Однако хлор, сера и углерод являются сложными элементами для ЛАЭС, т.к. наиболее интенсивные спектральные линии лежат в области вакуумного ультрафиолета. Поэтому в работе [2] использовалось дополнительное возбуждение лазерного факела электрической искрой, а в работе [3] – замена атмосферы инертным газом, но данные методы плохо подходят для реализации мобильной версии спектрометра.

Усиления амплитуд сигналов определяемых элементов можно достичь при помощи сдвоенных лазерных импульсов [4]. При этом первый импульс создает расширяющееся облако плазмы, вытесняющее окружающий газ, на которое налагается поток излучения второго лазерного импульса.

В разработанном мобильном спектрометре для обеспечения эрозии вещества использовался двухимпульсный лазер воздушного охлаждения с диодной накачкой, разработанный в Институте физики НАН Беларуси. Параметры основной гармоники генерации лазера: длина волны – 1064 нм, энергия импульса – до 55 мДж, стабильность энергии – $\pm 3\%$, длитель-

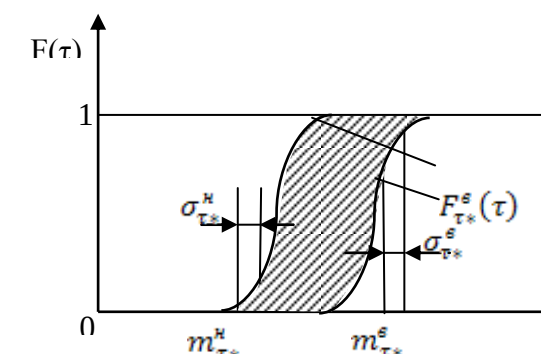


Рис. 1. Гиперслучайно-гиперслучайная модель определения границ области неопределенности при прогнозировании величины ОР

Таким образом, имея определенную выборку, соответствующую неизвестной величине τ (время) и неизвестным условиям g , а также априорную информацию о параметрах и характеристиках оценки и показателях ОР, с помощью метода гиперслучайных величин можно определить оценку ОР и оценить точность прогноза.

Представление величины ОР как гиперслучайной величины и его оценки, позволяет выделить границы оптимистического и пессимистического прогноза оценок величины ОР, с учетом условий наблюдений, что может позволить повысить точность оценивания и прогнозирования РХ СО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елисеева, М. А. Особенности оценивания ресурсных характеристик методом гиперслучайных величин / М. А. Елисеева, К. Н. Маловик // Проблемы розвитку та впровадження систем управління, стандартизації, сертифікації, метрології в регіонах України: Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції 7–10 квітня 2014 року. – Донецьк : ДонНТУ, 2014. – С. 31–36.
2. Маловик, К. Н. Развитие научных основ повышения качества оценивания и прогнозирования ресурсных характеристик сложных объектов: Монография / К. Н. Маловик. – Севастополь : СКУЭЭиП, 2013. – 332 с.
3. Маловик, К. Н. Систематизация методов оценивания рисков эксплуатации АЭС / К. Н. Маловик, М. А. Елисеева // Ядерная и радиационная безопасность. – 2014. – № 1. – С. 21–25.
4. РД 26.260.004-91 Руководящий документ. Методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации. – Разработан и внесен: Всесоюзным научно-исследовательским и конструкторским институтом химического машиностроения – НИИхиммаш. Разработчики : Р. Г. Маннапов, канд. техн. наук (руководитель темы); Е. Н. Гальперин, канд. техн. наук; Ткачева О.В. канд. техн. наук. – Дата введения 01.01.92.
5. Горбань, И. И. Теория гиперслучайных явлений / И. И. Горбань. – Киев : 2007. – 184 с.
6. Елисеева, М. А. Безопасность объектов критического применения. Развитие диаграммы Фармера / М. А. Елисеева, К. Н. Маловик // Стандарты и качество. – 2013. – № 7. – С. 40–41.

В данной работе рассмотрен подход к прогнозированию ОР с помощью метода гиперслучайных величин, математический аппарат которого является развитием теории вероятностей, что позволяет [1, 5]:

- сформулировать научно-техническое обоснование ограничений области неопределенности при прогнозировании ОР;
- более полно учитывать условия наблюдения и (или) измерений РХ;
- повысить точность оценивания и прогнозирования РХ за счет более качественного представления РХ как гиперслучайной величины.

Тогда можно представить ОР как гиперслучайную величину и определить его оценки границ области неопределенности.

Известны статистические методы оценки и прогнозирования ресурса оборудования СО [2], основанные на анализе его функции распределения как случайной величины. При этом под ОР можно рассматривать как математическое ожидание остаточной наработки, а под остаточной наработкой – оставшуюся случайную наработку оборудования до его перехода в предельное состояние [4]. Таким образом, ОР является вероятностной характеристикой надежности оборудования СО. Следовательно, оценивание ОР зависит, прежде всего, от того, насколько качественно проведено оценивание функции распределения или плотности распределения [2]. Так как в процессе эксплуатации решается задача прогнозирования поведения интенсивности отказов как статистическая задача, основанная на обработке исходной информации, то, следовательно, прогноз имеет некоторый разброс. Поэтому прогнозируемое поведение интенсивности отказов целесообразно определять между границами, характеризующими пессимистический и оптимистический прогнозы [2, 6].

При определении вероятностных границ ОР методом гиперслучайных величин предположим, что множество G охватывает множество всех вариантов условий формирования оцениваемой величины. Оцениваемая гиперслучайная величина ОР – представляет собой множество случайных величин τ/g , описывающих измеряемую величину при фиксированных условиях $g \in G$. Гиперслучайная оценка ОР, представляет собой множество гиперслучайных оценок τ^*/g , описывающих оценки случайных величин в условиях $g \in G$ [5].

При этом гиперслучайная оценка ОР задается:

а) вероятностными характеристиками:

- условной функцией распределения $F_{\tau^*/g}(\tau)$ для $\forall g \in G$;
- границами функции распределения $F_{\tau^*}^H(\tau), F_{\tau^*}^E(\tau)$;

б) условными параметрами:

- математическим ожиданием $m_{\tau^*/g}$;
- среднеквадратическим отклонением $\sigma_{\tau^*/g}$ для всех $g \in G$;

в) безусловными параметрами:

- математическими ожиданиями границ $m_{\tau^*}^H, m_{\tau^*}^E$;
- среднеквадратическими отклонениями границ $\sigma_{\tau^*}^H, \sigma_{\tau^*}^E$.

Графическое представление границ области неопределенности при прогнозировании величины ОР и его оценки представлено на рис. 1.

ность и частота повторения импульсов генерации – 10 нс и 10 Гц, соответственно, диаметр пучка – ≤ 6 мм, расходимость – $\leq 1,5$ мрад. Излучение лазера фокусировалось короткофокусной линзой (100 мм) на поверхность анализируемого образца.

Изображение плазменного облака с помощью короткофокусной линзы (3 см) отображалось (в масштабе 1:3) на торец кварцевого оптического волокна. В приборе использовался полихроматор MS2004i (производства белорусско-японской фирмы SOL Instruments), оснащенный дифракционной решеткой 1200 штрихов/мм, относительное отверстие – 1:3.7, фокусное расстояние – 200 мм.

Эмиссионный спектр регистрировался оптическим многоканальным анализатором (Орминс, Беларусь) на основе ПЗС линейки (Hamamatsu 10420), имеющей 2048x64 светочувствительных пикселей с размерами 14x14 мкм. Область спектральной чувствительности составляла 190–1100 нм.

Для получения максимальной чувствительности анализа из базы данных Гирвард-Смитсоновского центра астрофизики были выбраны наиболее интенсивные спектральные линии хлора, серы и углерода. Оценка интенсивности производилась согласно уравнению Саха-Больцмана по рассчитанной предварительно температуре плазмы $T=1,1$ эВ.

Наиболее интенсивные линии хлора Cl I 837,594 нм и серы S I 921,286 нм располагаются в ближней ИК области, а наиболее интенсивная линия углерода C I 247,856 нм лежит в ультрафиолете. Но поскольку в ИК также есть достаточно интенсивная линия углерода C I 909,483 нм (ее интенсивность лишь на 30 % меньше, чем интенсивность линии C I 247,856 нм), то ее с практической точки зрения удобнее использовать, т.к. это позволит регистрировать одновременно все элементы в одном спектральном окне (рис. 1).

Из спектра (см. рис. 1) видно, что применение сдвоенных импульсов приводит к существенному усилению спектра. Оценка температуры лазерной плазмы в одно- и двухимпульсном режиме, показали, что эффективная (полученная по усредненным во времени спектрам) температура не изменяется при переходе к режиму сдвоенных импульсов, в тоже время глубина кратера на поверхности образца, объем плазмы и время ее свечения увеличиваются. Это обеспечивает 5–6 кратное усиление спектральных линий хлора, серы и углерода.

Для повышения чувствительности спектрометра по хлору, сере и углероду была проведена оптимизация таких параметров анализа, как энергия импульса, длительность задержки между импульсами и глубина фокусировки лазерного излучения. Критерием оптимизации разработанных методик служила регистрируемая интенсивность спектральных линий, таких как: Cl I 837,59 нм, S I 921,29 нм, C I 909,483 нм. Было установлено, что оптимальное время задержки между лазерными импульсами составляет

1–2 мкс. При увеличении времени задержки интенсивность начинает снижаться. С ростом энергии лазерных импульсов от 10 до 55 мДж наблюдается рост интенсивности всех спектральных линий, так что при анализе следует использовать максимальную энергию. Оптимальная глубина фокусировки составляет ~ 2,5–3 мм под поверхностью образца.

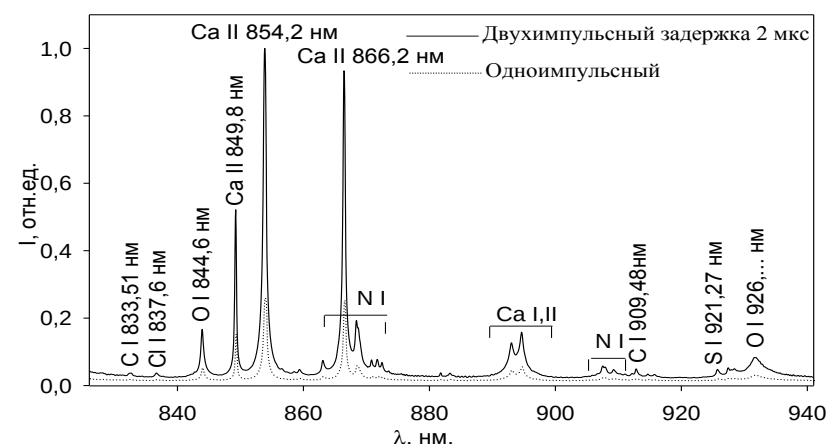


Рис. 1. Спектр образца бетона в одноимпульсном (100 мДж) и двухимпульсном (50+50 мДж) режиме возбуждения спектров

Предел определения хлора и серы в оптимальных условиях возбуждения, рассчитанный по 2σ-критерию, составляет ~ 0,15 %, для углерода ~ 0,26 %. Такой предел определения достаточен при анализе бетонов с ненапрягаемой арматурой. В России рекомендованный максимум водорастворимых хлоридов составляет: 1 % в железобетоне, защищенном от влаги; 0,3 % для прочих железобетонных конструкций [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алексеев, С. Н.** Долговечность железобетона в агрессивных средах / С. Н. Алексеев, С. Модры, П. Шисслъ. – М., 1990. – 320 с.
2. **Burakov, V.** Optimization of conditions for spectral determination of chlorine content in cement-based materials. / V. Burakov [et al.] // J. of Applied Spectroscopy. – Vol. 74. – 2007. – P. 321–327.
3. **Weritz, F.** Detector comparison for sulfur and chlorine detection with laser induced breakdown spectroscopy in the near-infrared-region. / F. Weritz [et al.] // Spectrochimica Acta B. – Vol. 62. – 2007. – P. 1504–1511.
4. **Babushoka, V. L.** Double pulse laser ablation and plasma: Laser induced breakdown spectroscopy signal enhancement. / V. I. Babushoka [et al.] // Spectrochim. Acta B. – Vol. 61. – 2006. – P. 999–1014.

УДК 519.21.001.8

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ ГИПЕРСЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН

М. А. ЕЛИСЕЕВА, К. Н. МАЛОВИК

«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ЯДЕРНОЙ
ЭНЕРГИИ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ»

Севастополь, Россия

Исследование вопросов по обеспечению долгосрочной эксплуатации потенциально опасных технических объектов, которые следует рассматривать как сложные объекты (СО) [1], требует особого внимания к оцениванию и прогнозированию ресурсных характеристик (РХ) их оборудования [2]. Определение уровня безопасности СО является актуальной задачей, решение которой заключается в оценивании и прогнозировании реального состояния оборудования, его РХ. При этом одним из важных факторов повышения качества оценки уровня безопасности СО служит обоснование и выбор наиболее эффективной математической модели для оценивания и прогнозирования РХ оборудования на всех стадиях его жизненного цикла [2, 3]. Тогда, можно получать более достоверную информацию для принятия обоснованных решений о продлении срока службы оборудования СО, либо о немедленной его замене.

Известно [2], что наиболее сложными для исследования и наименее изученными являются показатели ресурсоспособности и долгосрочной эксплуатации, рассматриваемые с помощью РХ, определяющей из которых можно считать остаточный ресурс (ОР) [2, 3]. Под ОР понимают запас возможной наработки оборудования СО после момента контроля его технического состояния (или ремонта), в течение которого обеспечивается соответствие требованиям нормативно-технической документации всех его основных технико-эксплуатационных показателей и показателей безопасности [4]. При этом возможность прогнозирования величины ОР обеспечивается при одновременном выполнении следующих условий: известны параметры, определяющие техническое состояние оборудования; известны критерии предельного состояния оборудования; имеется возможность периодического (или непрерывного) контроля значений параметров технического состояния.

По многим характерным для оборудования СО деградационным процессам указанные условия выполняются, однако по другим видам повреждений не все условия, необходимые для прогнозирования ОР, по существующим методикам оценивания и прогнозирования РХ могут выполняться, что требует проведения специальных исследований. При этом в зависимости от требуемой достоверности прогноза и возможностей получения информации применяют два подхода к прогнозированию: упрощенный, основанный на детерминистических оценках показателей, и уточненный, основанный на вероятностных оценках [4].

Разработанная система измерения обладает следующими преимуществами:

- отсутствие механического преобразователя;
- практическое отсутствие влияния на объект измерения;
- возможность установки большого числа датчиков на всей протяженности исследуемого упругого элемента;
- возможность оцифровки с помощью простых АЦП, которые имеют только однополярный вход. Указанное обстоятельство делает возможным применение для этой цели АЦП, которые встроены в микроконтроллеры общего назначения [3].

С помощью акселерометров, установленных в нескольких точках, которые расположены вдоль исследуемого упругого элемента через заданные интервалы, возможен также контроль величины усилий растяжения, которые действуют в переходных процессах. Величина допустимых возникающих усилий растяжения в упругом элементе является одним из критериев при формировании оптимального управляющего воздействия.

Ранее было установлено, что оптимальным является применение акселерометров, производящих измерение ускорения вдоль одной оси в диапазоне $\pm 5g$. При работе установки исключаются поперечные и крутильные колебания исследуемого упругого элемента. В качестве упругого элемента используется пружина большой длины. Благодаря свойству пружины сохранять параллельность линий, построенных перпендикулярно к оси пружины и внешней поверхности витков при деформациях, не превышающих определенной величины [4], становится возможным закрепить акселерометры непосредственно на витках пружины.

Разработанная система измерения ускорений пригодна для проведения исследований в режиме пуска установки, когда изменение длины упругого элемента незначительно, поскольку акселерометры связаны посредством проводников с микропроцессорной системой и блоком питания. На реальных промышленных установках возможно применение иных способов измерения скоростей и ускорений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рассудов, Л. Н. Электроприводы с распределенными параметрами механических элементов / Н. В. Рассудов, В. Н. Мядзель. – Л. : Энергоатомиздат, 1987. – 142 с.
2. Экспериментальное исследование частотных свойств механических элементов с распределенными параметрами / В. Т. Вишнеревский [и др.] / Вест. Белорус.-Рос. ун-та. – 2013. – № 4. – С. 112–119.
3. Трамперт, В. Измерение и регулирование с помощью AVR-микроконтроллеров : пер. с нем. / В. Трамперт. – К. : МК-Пресс, 2006. – 208 с.
4. Пономарев, С. Д. Расчет упругих элементов машин и приборов / С. Д. Пономарев, Л. Е. Андреева. – М. : Машиностроение, 1980. – 326 с.

УДК 620.179.14 СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ДЕФОРМИРОВАННЫХ И ТЕРМООБРАБОТАННЫХ СТАЛЕЙ

В. Н. КОСТИН, Д. Ю. ФИЛАТЕНКОВ, О. Н. ВАСИЛЕНКО,
А. Н. СТАШКОВ
ФГБУН ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ УрО РАН»
Екатеринбург, Россия

Высокая структурная чувствительность магнитоакустической эмиссии (МАЭ) нашла применение при исследовании структурных превращений, а также упругих и пластических деформаций ферромагнитных материалов [1–3]. Под магнитоакустической эмиссией принято понимать всю совокупность упругих колебаний, возникающих в ферромагнетике при его перемагничивании. Магнитная акустическая эмиссия несет информацию как о локальных магнитострикционных взаимодействиях, связанных с необратимыми смещениями 90-градусных доменных границ, так и о результирующем магнитострикционном изменении размеров ферромагнетика.

До настоящего времени для регистрации МАЭ чаще всего использовали обычные узкополосные пьезопреобразователи. При этом количественной характеристикой МАЭ являлось среднеквадратичное значение огибающей потока упругих колебаний. Такой способ регистрации не позволяет селективно оценивать вклады различных механизмов формирования МАЭ и определять их связь со структурой материалов. Между тем, процессы перестройки доменной структуры имеют различные размерные (например, площадь или длина пробега доменной границы), количественные (например, число одновременно смещающихся границ) и временные (время скачка Баркгаузена) характеристики и, соответственно, должны проявляться в различных участках спектра упругих колебаний.

Для выявления перспективных параметров контроля структурного состояния материалов был исследован комплекс магнитных и магнитоакустических свойств сталей различного химического состава, подвергнутых деформации и термической обработке [4]. При этом характеристики МАЭ определялись с применением широкополосных датчиков акустической эмиссии и цифрового анализа полученных спектров сигналов.

На ряде сплавов железа было установлено, что амплитуда A_{f_λ} низкочастотной ($f_\lambda = 2f_p$, где f_p – частота перемагничивания) гармоники МАЭ сигнала коррелирует с магнитострикционной чувствительностью $\gamma = d\lambda/dH$ материалов. Как видно из рис. 1 величина A_{f_λ} практически

линейно растет при увеличении γ для исследованных сплавов Fe-C и характер этой зависимости не меняется при изменении частоты перемагничивания. Учитывая, что магнитострикционные параметры весьма чувствительны к внешним и внутренним напряжениям, можно считать величину A_{f_λ} перспективным параметром контроля напряженно-деформированного состояния ферромагнитных изделий.

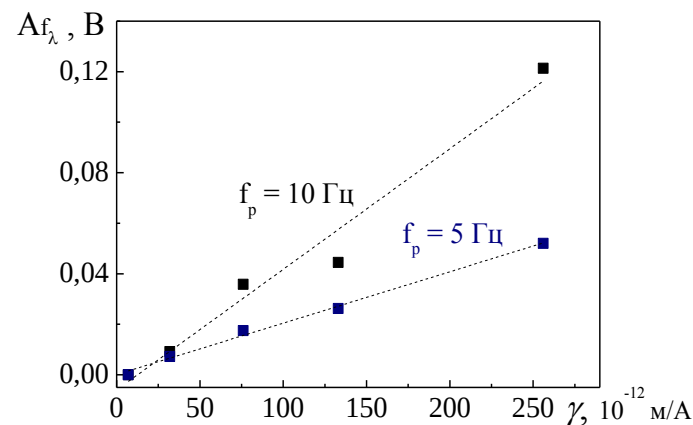


Рис. 1. Зависимость амплитуды гармоники f_λ от магнитострикционной чувствительности сплавов железа

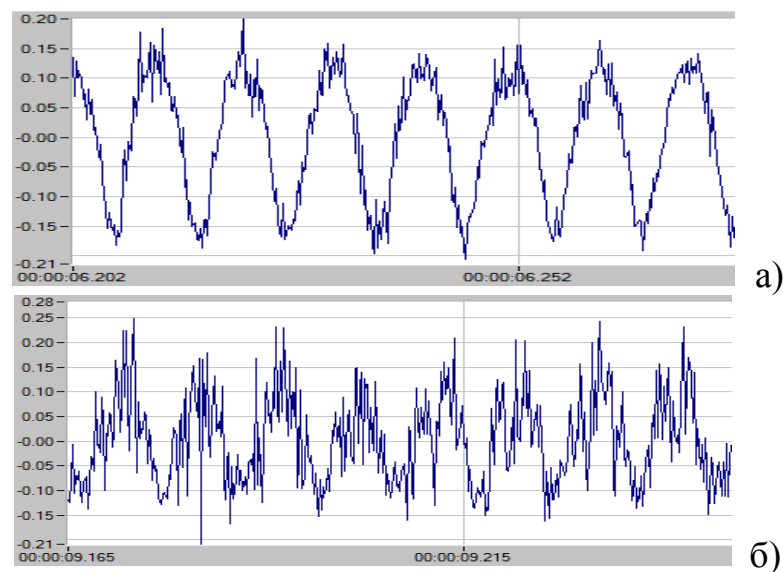


Рис. 2. Цифровые осциллограммы МАЭ сигналов образцов из стали 60С2А: а – $T_{омн} = 340^\circ\text{C}$; б – $T_{омн} = 600^\circ\text{C}$

Структурно-фазовое состояние сплавов Fe-C и, как следствие, доменная структура в очень большой степени меняется при такой обработке, как закалка с последующим отпуском при различных температурах. Исследо-

УДК 620.179

ПРИМЕНЕНИЕ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ ПРИ КОНТРОЛЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТЯЖЕННЫХ УПРУГИХ ОБЪЕКТОВ

В. Т. ВИШНЕРЕВСКИЙ, И. С. СТАСЕНКО, А. А. КОРНЕЕВ,
Г. С. ЛЕНЕВСКИЙ
ГУ ВПО «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Могилев, Беларусь

В настоящее время актуальной задачей является синтез систем управления электроприводами с распределенными параметрами. Указанные электроприводы как правило содержат в механической части протяженные упругие элементы. Наличие таких элементов создает дополнительные сложности при управлении электроприводами. Данное обстоятельство обусловлено колебательными свойствами упругих элементов, возможностью возникновения резонансных явлений, а также запаздыванием входного воздействия при его распространении вдоль упругого элемента. Возникновение нежелательных колебаний и биений может стать причиной аварий и выхода оборудования из строя. К электроприводам с распределенными параметрами относятся электроприводы шахтных подъемников с большой высотой подъема и конвейеры с лентами большой протяженности [1].

Синтез систем управления электроприводами с распределенными параметрами подразумевает наличие максимально полной информации об объекте управления. Для построения системы управления в данном случае необходимо наличие частотных характеристик, дающих представление о резонансных частотах объекта управления в рабочем диапазоне частот входного воздействия электропривода. Ввиду отсутствия возможности получения частотных характеристик реальных электроприводов экспериментальным путем, существует необходимость разработки расчетных методик получения указанных характеристик.

На кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ранее были проведены исследования, направленные на экспериментальное получение частотных характеристик [2], однако, для получения более адекватных результатов было принято решение изменить механику лабораторной установки и перенести исследуемый упругий элемент в вертикальную плоскость. В связи с внесенными изменениями возникла проблема измерения скорости ранее применявшимся способом. В связи с данным обстоятельством, было решено разработать систему измерения ускорений посредством акселерометров типа ADXL103 и на основании данных о мгновенных ускорениях получить представление о величинах скоростей линейного перемещения точек упругого элемента.

висимости от полученных показателей электрического сопротивления вводятся возможные дефекты работы подшипника.

На третьей вкладке ПО выявляется комплексная оценка подшипника скольжения агрегата металлургического производства. Характеристика основывается на полученной информации по двум основным параметрам (температура и электрическое сопротивление). Делается вывод по видам возможных дефектов при такой работе подшипника. Рассчитывается время примерного выхода подшипника из строя – что является одной из главных направлений производимой диагностики. Получение времени выхода подшипника скольжения из строя поможет специалисту разобраться в причинах возникновения тех или иных дефектов, а также своевременно предотвратить возможную поломку дорогостоящего оборудования и аварию.

Выводы: в результате данного исследования определены признаки, по которым осуществляется диагностика подшипников скольжения; написано соответствующее программное обеспечение, которое предназначено для выявления характеристик полноценной работы подшипника, а также причин возможного выхода из строя диагностируемого подшипника скольжения и способы предотвращения появления дефекта. Данное направление работы позволит значительно облегчить работу с подшипниками скольжения, уменьшить количество аварий и выходов из строя оборудования металлургического производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бирюков, Е. Н.** Автоматизация контроля технического состояния опор скольжения агрегатов металлургического производства / Е. Н. Бирюков, Е. В. Ершов // Производство проката. – 2008. – № 2. – С. 35–40.
2. **Барканова, Н. А.** Вибрационная диагностика машин и оборудования. Расчет основных частот вибрации узлов машин, параметров измерительной аппаратуры и практическая экспертиза / Н. А. Барканова, А. А. Борисов. – СПб : Центр СПбГМТУ, 2009. – 111 с.

E-mail: lnvinogradova@bk.ru
trafficspbdsur@mail.ru

вания, проведенные на сталях 09Г2, 35 и 60С2А показали, что общим для всех этих сталей является изменение характера МАЭ сигналов при повышении температуры отпуска. Повышение $T_{отп}$ значительно увеличивает вклад высокочастотных компонент в МАЭ сигнал (пример приведен на рис. 2).

Такое изменение характера сигнала может быть связано с ростом числа 90-градусных доменных границ вследствие появления замыкающих доменов вокруг укрупняющихся при средне- и высокотемпературном отпуске карбидных частиц.

Сопоставление магнитоакустических параметров с другими магнитными свойствами показало, что такие параметры МАЭ, как основная частота f^* (частота гармоники с наибольшей амплитудой и мощностью) и усредненная амплитуда упругих колебаний A_{cp} , коррелируют с остаточной магнитной индукцией вещества B_r деформированных и термообработанных сталей. Эта корреляция может быть объяснена тем, что остаточная магнитная индукция в большой степени зависит от 90-градусной подсистемы, являющейся в то же время источником МАЭ.

Полученные в работе результаты могут быть использованы при разработке магнитных и магнитоакустических методов контроля и диагностики.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов 12-П-2-1031 и РФФИ № 12-08-33098 мол-а-вед.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ranjan, R.** Magnetoacoustic emission, magnetization and barkhausen effect in decarburized steels / R. Ranjan, D. S. Jiles, P. K. Rastogi [Текст] // IEEE Trans. Magn. – 1986. – MAG-22. – N 5. – P. 511–513.
2. **Горкунов, Э. С.** Магнитоупругая акустическая эмиссия в ферромагнитных материалах 3. Влияние структурных изменений на магнитоупругую акустическую эмиссию (обзор) / Э. С. Горкунов, А. И. Ульянов, В. А. Хамитов // Дефектоскопия. – 2002 – № 5. – С. 86–112.
3. **Piotrowski, L.** The influence of elastic deformation on the properties of the magnetoacoustic emission (MAE) signal for GO electrical steel [Текст] / L. Piotrowski, M. Chmielewski, B. Augustyniak // Journal of Magnetism and Magnetic Materials – V. 324. – 2012 – P. 2496–2500.
4. Амплитудно-частотные характеристики магнитоакустической эмиссии термообработанных сплавов железа / В. Н. Костин [и. др.] // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т. 16. – № 5. – С. 103–110.

УДК 620.178
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПРОСТРАНСТВЕННО-АРМИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. П. КРЕНЬ, Т. А. ПРОТАСЕНЯ, *Т. А. КУЗНЕЦОВА
ГНУ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»
*ГНУ «ИНСТИТУТ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА
им. А. В. Лыкова НАН Беларуси»
Минск, Беларусь

В настоящее время пространственно-армированные углерод-углеродные материалы (УУКМ) получили широкое применение благодаря своим теплозащитным свойствам и прочностным характеристикам. Высокую прочность и жесткость композиционным материалам обеспечивает определенная укладка армирующих волокон по отношению к действующей нагрузке. Вследствие большого разнообразия нагрузок применяются различные схемы укладки арматуры, тем самым устраняя еще один недостаток этих материалов – малое сопротивление межслойному сдвигу и поперечному отрыву за счет создания межслойных связей. Именно в возможности придания материалу оптимальной, для каждого частного случая, анизотропии заключается главное преимущество волокнистых композиционных материалов.

В качестве арматуры при изготовлении пространственно-армированных материалов применяют высокомодульное углеродное волокно. В качестве связующего – графитированный или карбонизированный пек. При трудоемком технологическом процессе производства УУКМ большое значение имеет не только выбор соответствующего режима, но и его отлаженность, т.к. в ходе некоторых из них даже может происходить повреждение армирующего волокна, что негативно влияет на физико-механические свойства конечного изделия.

В настоящее время накоплен большой опыт по испытанию композиционных материалов. Однако практически все из них предназначены либо для контроля изотропных материалов, либо для изучения пластмасс, и на практике лишь приближенно адаптированы и для композиционных материалов. Данные методы не учитывают особенностей структуры и свойств композиционных материалов, что приводит к низкой воспроизводимости даже стандартных испытаний на растяжение, сжатие и изгиб. Особенно большие трудности вызывают испытания пространственно-армированных композиционных материалов вследствие явно выраженной структурной макронеоднородности, которая ограничивает выбор этих параметров. Кроме того, особый интерес представляет не только интегральная оценка

хуже условия теплоотдачи, тем выше температура теплового равновесия. С повышением температуры – понижается вязкость масла и увеличивается вероятность заедания цапфы в подшипнике. В конечном результате заедание приводит к выплавлению вкладыша. Перегрев подшипника является основной причиной его разрушения [2].

Для определения температуры подшипниковых опор скольжения был выбран метод получения температуры с помощью программируемого микроконтроллера DFRduino Nano и, подключаемого к нему, температурного датчика. Датчик помещается в металлургическое оборудование в место работы подшипника скольжения. Микроконтроллер подключается с помощью USB кабеля к компьютеру и получаемые данные считываются в режиме реального времени в ЭВМ.

На их основе на экран монитора выводится график температуры (рис. 1), а также главная составляющая программы – характеристика работы подшипника скольжения при полученной температуре. На экране монитора появляется информация о возможных проблемах в работе подшипника, видах дефектов, рассчитывается вязкость масла, обозначен оптимальный диапазон температуры.



Рис. 1. Диагностика подшипника скольжения по температуре

На второй вкладке программного обеспечения – выводится информация о проведенной диагностике работы подшипника скольжения по электрическому сопротивлению в режиме реального времени. Электрорезистивный сигнал, получаемый с вала, через преобразователь поступает в программируемый микроконтроллер DFRduino Nano. Далее он преобразуется в цифровую форму и подается непосредственно в ЭВМ. На экран монитора выводится график электрического сопротивления, а также характеристика диагностируемого подшипника. В качестве характеристики в за-

УДК 658.012
ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ МЕТОДАМИ
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Л. Н. ВИНОГРАДОВА, С. В. ДАНИЛИЦКИЙ
ФГБОУ ВПО «ЧЕРЕПОВЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
Череповец, Россия

Цель исследования – проведение оценки состояния опор скольжения агрегатов металлургического производства; мониторинг информации, поступающей непосредственно из металлургического оборудования; формирование характеристики произведенной диагностики, а также выявление времени возможного выхода подшипника скольжения из строя.

Современное металлургическое производство характеризуется интенсификацией нагрузок на оборудование в связи с увеличением скоростей и оптимизацией технологических процессов. В этих условиях большое внимание уделяется техническому состоянию наиболее подверженных износу и отказу узлов. К таким узлам относятся подшипниковые опоры. Для решения задач по определению их технического состояния разработаны средства диагностирования, принцип действия которых основан на анализе различных физических явлений, сопровождающих работу подшипника [1].

На кафедре «Математического и программного обеспечения ЭВМ» Череповецкого государственного университета проводятся исследования по определению технического состояния подшипниковых опор скольжения в режиме реального времени.

В основу оценки состояния подшипника скольжения заложены два диагностических признака:

а) температура, полученная в результате работы силы трения, которая нагревает непосредственно сам подшипник, а также его корпус и вал;

б) активное электрическое сопротивление, оцениваемое с помощью полученного непосредственно из зоны трения подшипника скольжения информационного электрорезистивного сигнала.

Программное обеспечение (ПО) разбито на три составляющих: диагностика по температурным показателям, диагностика по электрическому сопротивлению и общая характеристика диагностирования. Оценки состояния подшипника по температуре и электрическому сопротивлению происходят параллельно, независимо друг от друга.

Рассмотрим более подробно все три составляющие программного обеспечения.

Для любого установившегося режима работы подшипника существует тепловое равновесие: теплоотдача равна тепловыделению. При этом устанавливается определенная температура. Чем больше тепловыделение и

свойств пространственно-армированного материала, но и аддитивные составляющие вносимые как связующим, так и армирующим волокном.

В настоящей работе была исследована возможность контроля составляющих УУКМ методом динамического микроиндентирования с помощью прибора ИПМ-1 и методом статического индентирования, осуществляемого в нанометровом масштабе изменения нагрузок и деформаций на установке экспертного класса Hysitron. Индентирование осуществлялось в отдельные элементы УУКМ (рис. 1).

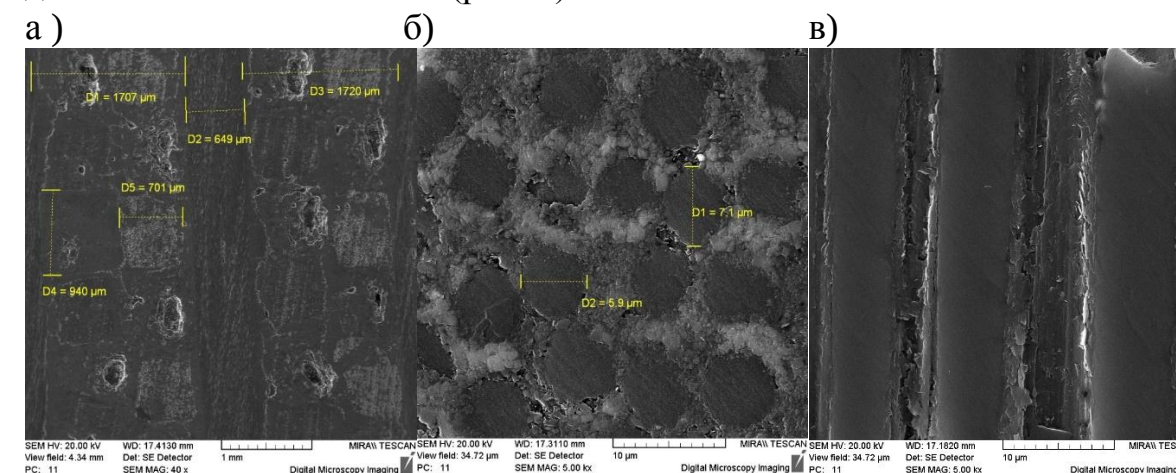


Рис. 1. Структура УУКМ: а – шлиф, на котором видны армирующие стержни (волокна) и пек; б – увеличенное изображение торца стержня; в – увеличенное изображение шлифа стержня (вдоль его оси)

Индентирование осуществлялось в центре и по краям на продольном и торцевом срезе волокна (рис. 2), а также в пек.

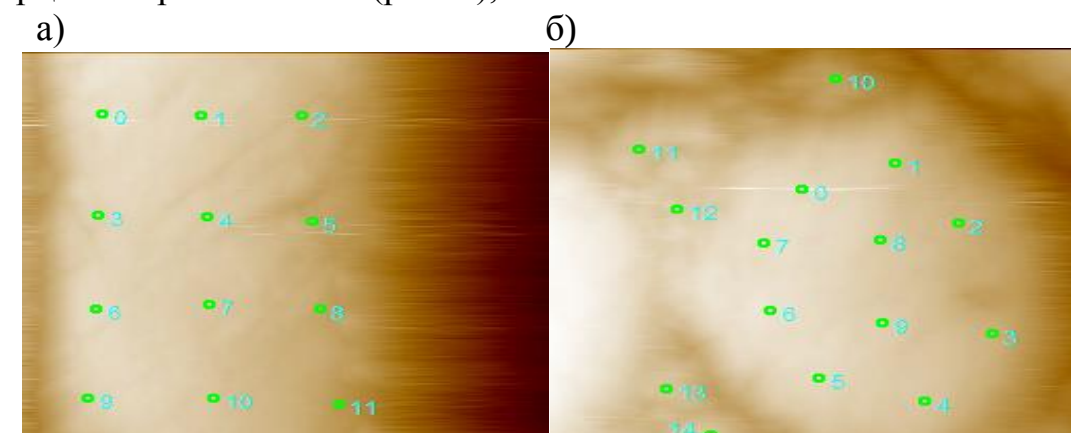


Рис. 2. Схема проведения измерения (точками показаны места, где проводилось наноиндентирование): а – продольный срез волокна, б – торец волокна, а также межволоконная фаза (пек)

Кривые «нагрузка-глубина внедрения индентора», полученные как для метода динамического микроиндентирования, так и для статического наноиндентирования представляли собой зависимости, характерные для упругого вдавливания. Для расчета значений модуля упругости E и твер-

дости *H* они обрабатывались по методу Оливера-Фара и методикам, разработанным в ИПФ НАН Беларуси [1, 2]. Типичные значения данных характеристик представлены в табл. 1.

Табл. 1. Измеренные значения характеристик

Направление индентирования	Место индентирования	Наноиндентирование		Динамическое микроиндентирование	
		<i>E</i> , ГПа	<i>H</i> , ГПа	<i>E</i> , ГПа	<i>H</i> , ГПа
В боковую поверхность волокна	В центре	8,17	1,05	10,1	0,63
	У края поверхности	6,68	0,87		
В торец волокна	В центре	22,92	3,18	14,0	0,94
	У края поверхности	20,64	2,86		
	Межволоконная фаза	18,26	1,55		

Представленные в табл. 1 данные показывают, что как метод динамического индентирования, так и особенно статическое наноиндентирование являются чувствительными к изменению свойств в различных направлениях армирования. Динамическое индентирование в силу больших размеров индентора (радиус сферического наконечника равен 0,5 мм) дает усредненную оценку свойств. Наноиндентирование позволяет провести расчет твердости и модуля упругости для каждого элемента структуры. Тем не менее, и тот и другой метод позволяют получить параметры, которые могут использоваться для расчета несущей способности материала согласно общепринятым методикам [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Oliver, W. C.** Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology / W. C. Oliver, G. M. Pharr // J. Mater. Res. – 2004. – Vol. 19. – № 1. – P. 3–20.

2. **Протасеня, Т. А.** Определение характеристик сопротивления разрушению углепластиков методом динамического индентирования пирамидой Виккерса / Т. А. Протасеня, А. П. Крень, В. А. Рудницкий // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – Т. 80. – № 3. – С. 46–50.

3. **Старченко, В. Н.** Расчет упругих характеристик фрикционных углеродных композитов для подвижного состава // Вестн. Днепропетровского нац. ун-та ж.-д. трансп. – 2006. – № 11. – С. 160–166.

E-mail: alekspk@iaph.bas-net.by
5657397@gmail.com

диагностических систем БГУИР, является многоканальным и осуществляет вычисление амплитудно-фазовых параметров вибрации в режиме разделения времени, с циклом опроса для 27 каналов не более 2 секунд [1, 3]. После дополнительной программной обработки данных, полученных этим комплексом, строится нормированная по частоте вращения ротора вибрационная характеристика (рис. 2).

Однако, в ряде случаев, когда скорость изменения частоты вращения ротора высокая, может потребоваться более точное вычисление вибрационных характеристик. В таких ситуациях может быть проведена непрерывная регистрация сигналов от датчиков вибрации и фазового датчика (рис. 1) с помощью измерительно-вычислительного комплекса «Тембр» [3]. Особый интерес представляют данные, полученные при изменении частоты вращения ротора в зоне собственных частот.

Для обработки полученных непрерывных сигналов и вычисления амплитудно-фазовых параметров разработаны алгоритмы и программное средство, выполняющее порядковый анализ вибрации и реализующее разнообразные формы представления результатов [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бранцевич, П. Ю.** ИВК «Лукомль-2001» для вибрационного контроля / П. Ю. Бранцевич // Энергетика и ТЭК. – 2008. – № 12 (69). – С. 19–21.

2. **Бранцевич, П. Ю.** Способ анализа вибрационных сигналов при исследовании технического состояния механизмов / П. Ю. Бранцевич // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2012) : сб. ст. II Междунар. заочной науч.-техн. конф. – Тольятти : Изд-во ПВГУС, 2012. – Ч. 1. – С. 244–250.

3. **Бранцевич, П. Ю.** Компьютерные вибродиагностические системы / П. Ю. Бранцевич [и др.] // Междунар. науч.-техн. конф., приуроченная к 50-летию МРТИ–БГУИР : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Минск : БГУИР, 2014. – Ч. 1. – С. 430–431.

4. **Бранцевич, П. Ю.** Определение параметров нестационарных вибрационных сигналов / П. Ю. Бранцевич // Алгоритмические и программные средства в информационных технологиях, радиоэлектронике и телекоммуникациях: сб. статей I междунар. заочной науч.-техн. конф. – Тольятти : Изд-во ПВГУС, 2013. – Ч. 2. – С. 236–243.

E-mail: branc@bsuir.edu.by

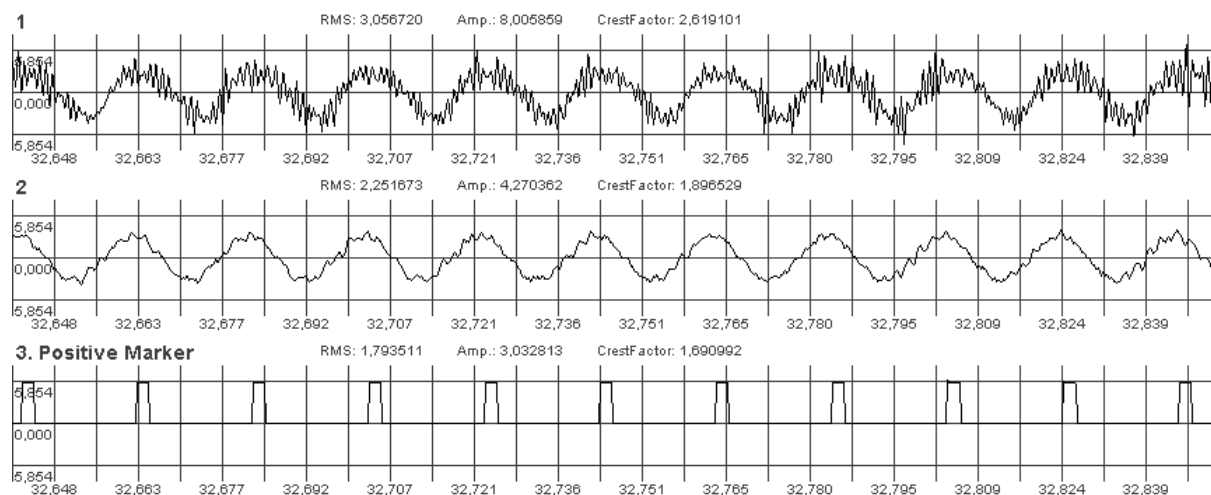


Рис. 1. Пример вибрационных сигналов и сигнала от датчика фазовой метки при определении амплитудно и фазочастотных вибрационных характеристик

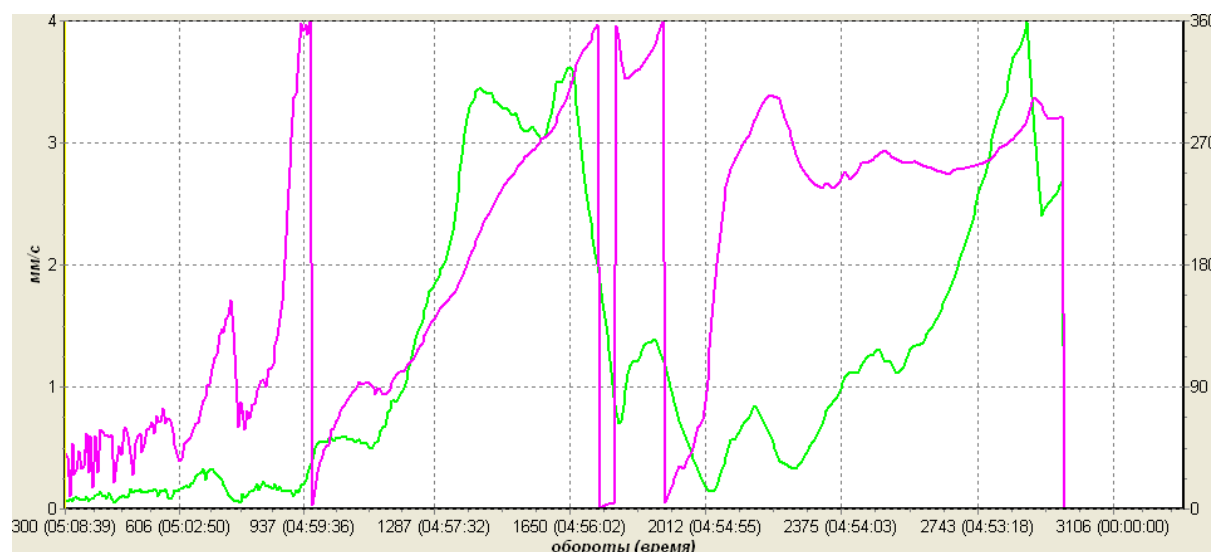


Рис. 2. Амплитудно и фазочастотные вибрационные характеристики подшипниковой опоры турбоагрегата

Знание АЧХ подшипниковых опор позволяет обоснованно планировать проведение пусковых работ. Если на протяжении эксплуатационного периода агрегата фиксировать все вибрационные характеристики пусков и выбегов, то эти данные могут служить основой для создания системы оценки его технического состояния, а также достаточно эффективно обнаруживать изменения технического состояния.

Определение амплитудно и фазочастотных вибрационных характеристик может производиться стационарными системами вибрационного контроля и мониторинга или переносными приборами.

Измерительно-вычислительный комплекс серии «Лукомль», разработанный и производимый научно-исследовательской лабораторией вибро-

УДК 677.017.4

ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСМИНАЕМОСТИ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ю. М. КУКУШКИНА, Е. В. БОНДАРЕВА
УО «ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
Витебск, Беларусь

Для достижения формообразования в изделии, в процессе изготовления и при эксплуатации текстильные материалы для одежды испытывают воздействия изгибающих сил. Текстильные материалы легко изгибаются при незначительных нагрузках и даже под действием собственной тяжести. При изготовлении одежды, особенно при выполнении швов, подгибании нижних срезов рукавов, брюк, юбок и т.п., требуется, чтобы материал обладал способностью изгибаться. Однако образование на материале одежды в процессе эксплуатации исчезающих складок, морщин и т.д. приводит к изменению размеров и формы одежды, к ухудшению ее качества. Таким образом, в производстве швейных изделий свойства материалов при изгибе играют важную роль, а требования к ним часто носят противоречивый характер.

Одной из характеристик изгиба текстильных материалов, относящейся по классификации, представленной в [1], к одноцикловым неразрывным характеристикам, является сминаемость. Сминаемость характеризует способность текстильных материалов под действием деформаций изгиба и сжатия образовывать исчезающие складки и морщины. Поскольку потребитель всегда интересуется сохранением формы изделия, при оценке качества материалов применяют термин «несминаемость». Несминаемость – характеристика противоположная сминаемости, которая характеризует способность материала сопротивляться смятию и восстанавливать первоначальное состояние после снятия нагрузки.

Методы определения несминаемости (сминаемости) тканей делятся на две группы в зависимости от способа осуществления смятия – ориентированного или неориентированного. При контроле качества тканей и стандартизации показателей несминаемости чаще используют методы ориентированного смятия, т. е. смятия образца ткани в одном направлении. Данные методы определения несминаемости материалов являются стандартными и все имеют сходство в том, что включают следующие этапы:

- а) складывание проб так, что соседние их части поворачиваются одна относительно другой на 180° ;
- б) воздействие на сложные пробы в течение определённого времени постоянного давления, что вызывает образование складок;
- в) отдых после снятия давления;

г) оценка несминаемости [2].

Наиболее распространенным является метод оценки несминаемости по углу восстановления предварительно сложенной и сжатой пробной полоски ткани. Данный метод представлен в ГОСТ 19204-73 [3], по которому определяют несминаемость всех тканей, кроме шерстяных, и нетканых полотен. По данному стандарту испытания проводят на приборе СМТ. Пробу Т-образной формы размерами 24×24 мм складывают под углом 180° и подвергают действию груза в течение 15 мин. Затем груз снимают и через 5 мин с помощью специальных приспособлений измеряют угол восстановления α . Несминаемость в данном случае характеризуется относительной величиной, которая определяется отношением угла восстановления к углу полного сгиба 180° и выражается в процентах. В настоящее время введены нормативы несминаемости для тканей и других текстильных материалов [1]. Малосминаемыми считаются те материалы, у которых показатель несминаемости не менее 55–60 %, т. е. угол восстановления при этом должен быть не менее 100–108°.

Данный метод очень трудоёмкий, предполагает наличие опытной лаборатории и затрат времени на проведения испытаний. Поскольку современный ассортимент материалов для швейных изделий очень разнообразен, определить несминаемость всех выпускаемых материалов стандартным методом практически не возможно. Поэтому, при определении несминаемости, часто пользуются простым и доступным методом неориентированного смятия, сущность которого заключается в сжатии рукой собранного в комочек материала с последующей визуальной оценкой его несминаемости. Данный метод испытания субъективен, однако, его применение пользуется популярностью при первичной оценке несминаемости материала либо при отсутствии или недоступности необходимой приборной базы (прибора СМТ).

Для того чтобы получить более объективную первичную оценку несминаемости материалов, предлагается экспресс-метод ориентированного смятия (рис. 1). Испытания материалов на несминаемость данным методом включают те же вышеперечисленные этапы, что и стандартные методы, а именно – сгибание материала при помощи зажимных пластин на 180°, выдерживание в течение 15 минут при давлении 1 кгс/см² и измерение угла восстановления после 5 минут отдыха. Преимуществом данного экспресс-метода является то, что, во-первых, при проведении испытаний нет необходимости выкраивать образцы материалов, оценить несминаемость того или иного материала можно непосредственно в рулоне; во-вторых, портативность, легкость и простота приспособления для проведения данных испытаний позволяет провести их в любой момент, в любом месте, без больших затрат времени и сил.

УДК 004.42:519.67:534-16

ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ АМПЛИТУДНО И
ФАЗОЧАСТОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

П. Ю. БРАНЦЕВИЧ, Е. Н. БАЗЫЛЕВ

УО «БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

Минск, Беларусь

Для контроля, мониторинга и оценки технического состояния механизмов и оборудования с вращательным движением широко используются параметры их вибрационного состояния.

Современные средства вибрационного контроля и диагностики достаточно часто представляют собой компьютерный аппаратно-программный комплекс [1].

Основными методами обработки вибросигналов, применяемыми в прикладных программах, являются преобразования сигналов во временной и частотной областях. Обычный спектральный анализ представляет реальный вибросигнал в виде совокупности гармоник. Каждая гармоника имеет частоту, амплитуду и начальную фазу. Эти параметры считаются неизменными в течение времени регистрации и обработки вибросигнала. Такой подход удобен при описании периодических или близких к ним сигналов [2]. Однако вибросигнал, описывающий интенсивно изменяющийся процесс, наблюдаемый при нестационарных, с точки зрения частоты вращения ротора, режимах работы контролируемых объектов, сложно правильно оценить с помощью равномерного спектрального анализа. В связи с этим возникает ряд задач, подлежащих решению: определение временных интервалов, на протяжении которых происходят пуски и выбеги, и функциональных закономерностей изменения амплитуды, частоты, фазы оборотных составляющих вибрации (частотных составляющих со значением частоты, кратным частоте вращения ротора) при пусках и выбегах; разработка математических моделей вибрационных сигналов для нестационарных режимов, методов и алгоритмов определения их амплитудно-фазовых параметров; реализация алгоритмов и программ для обработки экспериментально полученных вибрационных сигналов при нестационарных режимах работы контролируемых объектов.

Проведение синхронной обработки вибрационных сигналов и сигнала от датчика фазовой метки (рис. 1), например, на этапе выбега, когда частота вращения вала изменяется от номинальной до нуля, предоставляет возможность вычислить амплитудно и фазочастотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) контролируемого объекта и выявить все собственные и местные резонансы конструкции в точке контроля (рис. 2).



Рис. 2. Вибрационные характеристики выбега с большими отличиями

Обнаружение при автоматизированном сопоставительном анализе существенных отличий в сравниваемых характеристиках является основанием для выяснения причин такого изменения.

Следует отметить, что получить хорошие, с практической точки зрения результаты, используя рассмотренные подходы, можно только при обоснованном выборе пороговых уровней для решающих функций по отдельным параметрам, а также весовых коэффициентов при вычислении обобщающих решающих функций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Компьютерные вибродиагностические системы / П. Ю. Бранцевич [др.] // Междунар. науч.-техн. конф., приуроченная к 50-летию МРТИ–БГУИР: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Минск : БГУИР, 2014. – Ч. 1. – С. 430–431.
2. **Фор, А.** Восприятие и распознавание образов / А. Фор. – М. : Машиностроение, 1989. – 272 с.

E-mail: branc@bsuir.edu.by

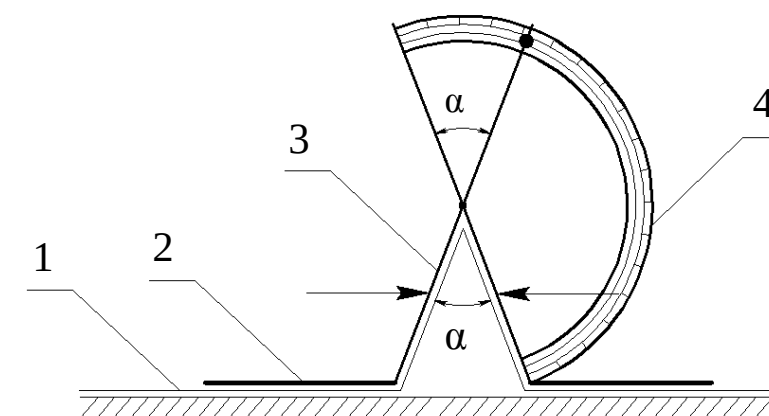


Рис. 1. Определение несминаемости материалов экспресс-методом: 1 – материал; 2 – опорная пластина; 3 – зажимная пластина; 4 – шкала; α – угол восстановления

Для апробации экспресс-метода были проведены испытания с помощью разработанного приспособления. В качестве объектов исследования были выбраны льняные ткани производства РУПТП “Оршанский льнокомбинат”, так как данный ассортимент тканей обладает повышенной сминаемостью. Эти же ткани были исследованы с помощью стандартного метода на приборе СМТ. В результате были получены достаточно сопоставимые результаты по которым можно сделать вывод, что предлагаемый экспресс-метод можно использовать при первичной оценке несминаемости текстильных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бузов, Б. А.** Материаловедение в производстве изделий легкой промышленности (швейное производство) : учебник для студ. высш. учеб. заведений / Б. А. Бузов, Н. Д. Алыменкова ; под ред. Б. А. Бузова. – 2-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2004. – 448 с.
2. **Кукин, Г. Н.** Текстильное материаловедение (текстильные полотна и изделия) : учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г. Н. Кукин, А. Н. Соловьев, А. И. Кобляков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Легпромбытиздат, 1992. – 272 с.
3. **ГОСТ 19204–73.** Плотна текстильные. Метод определения несминаемости. – Введ. 01–01–1971. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 5 с.

E-mail: julzanna@mail.ru
elenka2012b@mail.ru

А. П. МАРКОВ, С. С. СЕРГЕЕВ
ГУ ВПО «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Могилев, Беларусь

Преимущества оптоволоконных преобразований в структурах оптико-электронных мутнометров в большей мере проявляются в спектрально-энергетических взаимодействиях неоднородностей с лучистым потоком Φ_λ .

Лучистый поток, как носитель первичной информации, характеризуется абсолютным значением (амплитудой, интенсивностью) и спектрально-энергетическим распределением.

В общем случае абсолютное значение лучистого потока Φ_λ определяется эффектом суммарного воздействия на среду и может быть представлено выражением:

$$\Phi_\lambda = F \cdot \int_0^\infty b_\lambda \cdot \tau_\lambda \cdot d\lambda, \quad (1)$$

где F – эффективный коэффициент использования отображаемого средой лучистого потока; b_λ – плотность энергии отображаемого средой излучения; τ_λ – коэффициент спектрального преобразования излучения при взаимодействии со средой.

Из выражения (1) следует, что для определения Φ_e в зависимости от принятого информативного параметра неоднородной среды необходимо вычислить интеграл:

$$\Phi_e = \int_0^\infty b_\lambda \cdot \tau_{i\lambda} \cdot d\lambda. \quad (2)$$

При этом неопределенность в функциональной зависимости b_λ и $\tau_{i\lambda}$ ограничивает возможность установления определенной связи между эффективным потоком Φ_e и физико-техническим состоянием неоднородной среды. Однако с учетом специфики неоднородностей и их спектрально-энергетического взаимодействия с излучением устанавливаются приближенные аналитические зависимости Φ_e для различных по природе и геометрии неоднородностей в ограниченных диапазонах спектра и для каждого τ_λ .

Для некоторой эффективной длины волны $\lambda_{эф}$ отражаемое средой излучение более достоверно отображает состояние и свойства как неоднородностей, так и неоднородной среды. Именно в параметрах информативного излучения и спектральном распределении лучистого потока сосредото-

При сравнении характеристик (функций) выбега следует учитывать их соотношения по амплитуде и по форме, причем одна из функций принимается за базовую, а вторая – за сравниваемую.

Выводы о подобии характеристик принимаются на основе решающей функции, которые имеет следующий вид:

$$FR(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq X_1; \\ 0.25, & \text{если } X_1 < x \leq X_2; \\ 0.5, & \text{если } X_2 < x \leq X_3; \\ 0.75, & \text{если } X_3 < x \leq X_4; \\ 1, & \text{если } X_4 < x, \end{cases} \quad (1)$$

где x – параметр, относительно которого определяется значение решающей функции; X_j – значения пороговых уровней, причем $X_1 < X_2 < X_3 < X_4$. Их количественные значения выбираются на основе экспертных оценок и накапливаемых экспериментальных данных.

В качестве обобщающего, при сопоставлении характеристик выбега, предлагается параметр, вычисляемый в соответствии с выражением:

$$r = \frac{d(V_i, V_j)}{A_{прив,i}},$$

где $d(V_i, V_j)$ – расстояние по Манхеттену между двумя функциями, базовой (V_i) и текущей (V_j), представленными векторами (массивами) значений, приведенное к одному отсчету и вычисляемое как [2]

$$d(V_i, V_j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |v_{i,k} - v_{j,k}|;$$

$A_{прив,i}$ – приведенная амплитуда базовой функции:

$$A_{прив,i} = POST_i + \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (v_{i,k} - POST_i)^2},$$

где $POST_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N v_{i,k}$.

Очевидно, что параметр r может принимать только положительные значения и показывает как по амплитуде относительно удалена текущая характеристика в сравнении с приведенной амплитудой базовой характеристики.

Применение решающей функции (1) к параметру r позволяет сделать смысловые выводы о степени подобия сравниваемых характеристик. Если $FR(r) < 0.25$, то следует вывод "очень похожи", если $0.25 \leq FR(r) < 0.5$, то – "похожи, но есть и отличия", если $0.5 \leq FR(r) < 0.75$, то – "существенно отличаются", если $0.75 \leq FR(r) < 1$, то – "сильно отличаются", если $1 \leq FR(r)$, то – "совершенно не похожи".

В качестве примера на рис. 2 представлены характеристики с большими отличиями.

П. Ю. БРАНЦЕВИЧ

УО «БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

Минск, Беларусь

Современные штатные системы вибрационного контроля по своей сути являются измерительно-вычислительными комплексами. Их функциональные возможности позволяют: определять интенсивность вибрации в стандартизованных или задаваемых частотных диапазонах, частоту вращения вала, значения амплитудных и фазовых параметров, по крайней мере, до десяти спектральных составляющих вибрации, кратных частоте вращения; решать задачи сравнения реально полученных значений с контрольными (величина которых может изменяться от точки к точке и с течением времени) и вырабатывать сигналы (сообщения), выдаваемые на исполнительные и отображающие устройства; осуществлять сохранение получаемых разнообразных данных в специально структурированных файлах; решать задачи защитного отключения; поддерживать сетевое взаимодействие по данным с другими системами или работать в качестве базовой первичной станции в многоуровневых системах поддержки принятия решений и управления технологическими процессами [1].

Важную информацию об изменении технического состоянии механизма можно получить путем сравнительного анализа вибрационных характеристик, получаемых с помощью систем виброконтроля, при пусках или остановках турбоагрегата. Вибрационная амплитудная характеристика выбега (пуска) представляет собой зависимость изменения размаха виброколебаний в точке контроля от частоты вращения вала (рис. 1).

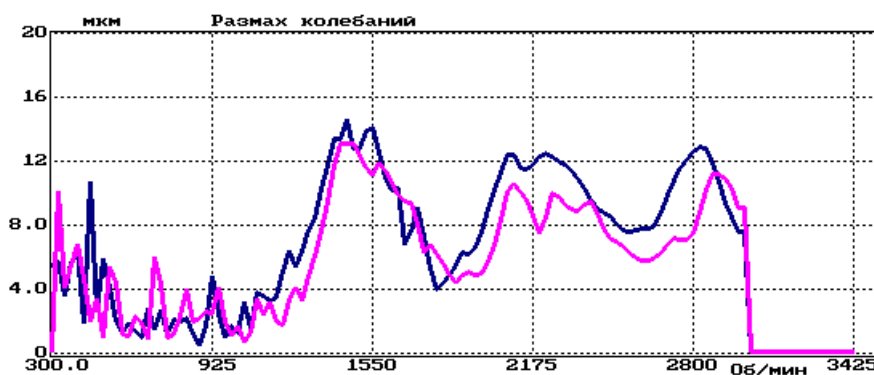


Рис. 1. Пример вибрационных амплитудных характеристик выбега

тачивается первичная информация. Тогда в сравнении экстремальных значений лучистых потоков $\Phi_{эф}$ и $\Phi_{он}$ (опорный поток с минимальными значениями параметров) для ограниченного участка спектра более эффективно реализуется информационно-преобразовательный процесс.

В процессе трансформации информативного излучения от неоднородной среды до получения выходного сигнала сказывается дестабилизирующее влияние ряда технологических, физических, схемных внутренних и внешних факторов по каждой операции и каждым функциональным элементом структуры мутномеров. При этом определяющей является методическая погрешность формирования информативного излучения.

В качестве основных признаков мутности среды и источников информации о ее пространственно-временных изменениях выступают диффузно-рассеивающие неоднородности. Объемное распределение таких источников определяется некоторой постоянной скоростью и ориентировано относительно визирной оси. При этом начало отсчета времени совпадает с моментом прохождения неоднородности через визирную ось оптического волокна системы трансформации излучения.

При попадании элементарной неоднородности в поле зрения оптического приемника формируется оптический сигнал (импульс), значение которого $\Delta\Phi(t)$ определяется выражением:

$$\Delta\Phi(t) = \begin{cases} \frac{E}{\pi} \cdot \Delta S_i \cdot \frac{S_0}{l^2} \cdot e^{-\int_0^1 \alpha_i dl} & npi \quad 0 < t < t_i \\ 0 & npi \quad t < 0 \quad u \quad t > t_i \end{cases} \quad (3)$$

Применительно к неоднородной среде длительность такого импульса определяется выражением:

$$t_i = \frac{l \cdot b_1}{f \cdot \mathcal{Q}_i}, \quad (4)$$

где f – фокусное расстояние; b_1 – линейный размер отверстия приемного световода; $\mathcal{Q}_i$ – скорость i -ой частицы.

Вероятность обнаружения неоднородности в поле зрения объема V за время t описывается по закону Пуассона:

$$p_n(t) = e^{-\bar{n}} \cdot \frac{(\bar{n})^n}{n!}, \quad (5)$$

где $\bar{n} = n_0 \cdot V \cdot t$ – математическое ожидание числа неоднородностей; n_0 – их среднее число, появившееся за единицу времени t в единице объема V .

Математическое ожидание проявления информативного сигнала (светового) от неоднородностей, появившихся в элементарном объеме dV поля зрения оптической системы, определяется выражением:

$$d\bar{\Phi} = n_0 \cdot \frac{E \cdot \Delta \bar{S}_i}{\pi} \cdot \frac{S_0 \cdot b_1}{l \cdot f \cdot \Delta \mathcal{G}_i} \cdot e^{-\int_0^l \alpha dl} \cdot dV, \quad (6)$$

где $\Delta \bar{S}_i$, $\Delta \mathcal{G}_i$ – математическое ожидание сечений и скоростей частиц в элементарном объеме; $\Delta V = \frac{S_1 \cdot l}{f} \cdot dl$ – элементарный объем поля зрения оптического приемника; S_1 – площадь освещенной части входного торца приемного световода.

Для случая, когда торец световода воспринимает информативное излучение, вся площадь световода освещена $S_1 = a_1 \cdot b_1$. Тогда элементарный информативный поток $d\bar{\Phi}_i$ будет представлен выражением:

$$d\bar{\Phi}_i = n_0 \cdot \frac{E}{\pi} \cdot \Delta \bar{S}_i \cdot S_0 \cdot \frac{a_1 \cdot b_1^2}{f^2 \cdot \Delta \mathcal{G}_i} \cdot e^{-\int_0^{l_1} k \cdot dl} \cdot dl. \quad (7)$$

При $k = \text{const}$, просуммировав элементарный поток $\Delta \bar{\Phi}_i$ в пределах от l_0 до l_1 получим:

$$\Delta \bar{\Phi}_i = n_0 \cdot \frac{E}{\pi} \cdot \Delta \bar{S}_i \cdot S_0 \cdot \frac{a_1 \cdot b_1^2}{f^2 \cdot \Delta \mathcal{G}_i \cdot \alpha} \cdot (e^{-\alpha \cdot l_0} - e^{\alpha \cdot l_1}). \quad (8)$$

В такой модели информативный поток от неоднородностей, появившихся в поле зрения приемного световода, учитывает концентрацию и структуру этих частиц, их освещенность, форму и размеры, площадь освещенной части торца приемного световода, фокусное расстояние, скорость движения частиц, коэффициент поглощения среды. Все эти факторы специфически воздействуют на информативный сигнал и не имеют корреляционных связей. Для независимых величин результирующее воздействие определяется суммой средних квадратических отклонений отдельных параметров волоконно-оптического преобразователя.

Предельная погрешность Δ_{np} и средняя квадратическая σ определяются законом распределения этих погрешностей. Для нормального закона распределения принято $\Delta_{np} = 3 \cdot \sigma$. Тогда значение σ_{np} рассчитывается по следующей зависимости:

$$\sigma_{np} = \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial E}\right)^2 \cdot \sigma_E^2 + \left(\frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial f}\right)^2 \cdot \sigma_f^2 + \left(\frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial S_1}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial T}\right)_{T=20}^2 \cdot \sigma_T^2}. \quad (9)$$

Приняв в качестве источника излучения светодиод, имеем нестабильность мощности излучателя 0,3 % на 10° К. Нестабильность площади освещения торца приемного световода зависит как от источника питания, так и от формы неоднородностей, состояния поверхности торца световода, эффективной его площади (с учетом обломанных световодов $\approx 0,5$ %).

ным образом и плоскостью зажима, рад (угол, зависящий от тягучести кожи).

Величину этого угла можно рассчитать по формуле:

$$\varphi = \arccos \left(\frac{-H(r+\delta) + (r+\delta)^2 + R\sqrt{R^2 + H^2 - 2H(r+\delta)}}{(r+\delta)^2 + R^2 + H^2 - 2H(r+\delta)} \right), \quad (2)$$

где H – величина хода пуансона, мм.

В табл. 1. показаны значения меридиальной деформации ИК получены при расчете по формуле (1).

Табл. 1. Значения меридиальной деформации ИК

Показатели	NUBUK 231PMB	NUBUK- 232	NUBUK 412A.YSL.	NUBUK 413K.YSL	NUBUK- 517	NUBUK- 518	NUBUK- 520	NUBUK 521 A.MV.	NUBUK 522	NUBUK 524	NUBUK- 605	NUBUK 606
Ход пуансона, мм	8,74	8,805	8,754	8,12	8,772	8,781	8,761	8,787	8,808	8,717	8,791	8,717
Меридиальная деформация	31,9	31,7	31,9	31,9	31,9	31,8	31,9	32	2,0	31,8	2,0	2,0

Знания значений меридиальной деформации позволят специалистам предприятий правильно подобрать материалы для различных способов формования, что даст возможность снизить затраты, связанные с возвратом обуви по таким дефектам как отдушистость, отмин, наличие складкообразования, потери формы и т. д. Этот способ неразрушающего контроля особенно актуален на этапе подготовки производства.

Проведение подобного рода работ особенно актуально в связи с расширением товарооборота в рамках таможенного союза и предстоящим вступлением Республики Беларусь в ВТО. Разработанное устройство позволит проводить испытания материалов сферическим растяжением по ГОСТ 938.16–70, ГОСТ 29078-91, ISO 3379-76, ISO17695-2004 в соответствии с требованиями ТНПА. При этом исключается необходимость закупки дорогостоящих средств измерений иностранного производства, а также сокращается время на проведение испытаний [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приборы для исследования свойств материалов при продавливании сферической поверхностью / А. Н. Буркин [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2007. – № 2 (37). – С. 27–30.

E-mail: wilij@mail.ru

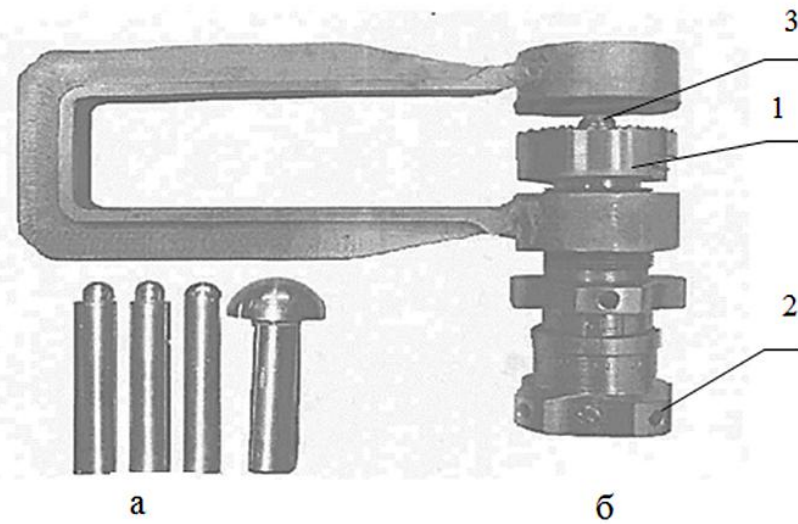


Рис. 1. Устройство для оперативного контроля качества материалов: а – пуансоны диаметром, 25, 6,5, 10 и 20 мм; б – внешний вид устройства

Техническая сущность процесса деформации материала в устройстве показана на рис. 2.

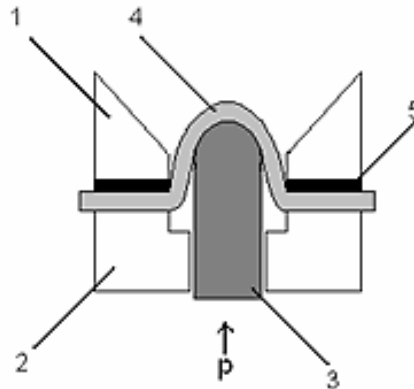


Рис. 2. Общий вид процесса деформации материала: 1- верхний зажим; 2 - поджимная губка нижнего прижима; 3 - формующий пуансон; 4 - образец тестируемого материала; 5 - шайба трения; P - деформирующая нагрузка

Для оценки деформационных свойств была предложена формула (1), связывающая величину деформации материала на пуансоне с его перемещением

$$E_m = \left(C + \frac{\delta}{R} \right) (\varphi - \operatorname{tg} \varphi) + \frac{1}{\cos \varphi} - 1, \quad (1)$$

где E_m – удлинение образца по меридиану (величина меридианной деформации); R – радиус рабочего образца (внутренний радиус зажимного кольца), мм; δ – толщина материала, мм; C – постоянная величина прибора, определяемая отношением r к R ; r – радиус формующего пуансона, мм; φ – угол между боковой поверхностью конуса образованного деформирован-

Важное значение в метрологической оценке трансформации излучений имеет дифференцированный учет влияния по составляющим методической погрешности. Такой учет производится по частным производным дестабилизирующих факторов каждого параметра.

Для определения характера влияния ориентации световодного излучателя на выходной сигнал оптико-электронного преобразователя продифференцируем выражение (8) по параметру f с учетом того, что при этом величина фототока равна:

$$I_{\phi n} = \frac{1}{\pi} \cdot P_{uu} \cdot K_c \cdot S_{\phi n} \cdot n_0 \cdot \Delta \bar{S}_i \cdot S_0 \cdot \frac{S_1 \cdot b_1}{f^2 \cdot \bar{g}_i \cdot \lambda} \cdot (e^{-\alpha \cdot l_0} - e^{-\alpha \cdot l_1}), \quad (10)$$

где P_{uu} – мощность излучения излучателя при номинальном токе; K_c – коэффициент потерь мощности оптического излучения в световоде; $S_{\phi n}$ – интегральная чувствительность фотоприемника.

Преобразовав выражение (10), получим:

$$\frac{\partial I_{\phi n}}{\partial f} = \frac{1}{\pi} \cdot P_{uu} \cdot K_c \cdot S_{\phi n} \cdot n_0 \cdot \Delta \bar{S}_i \cdot \frac{2 S_1 \cdot b_1}{f^3 \cdot \bar{g}_i \cdot \lambda} \cdot (e^{-\lambda \cdot l_0} - e^{-\lambda \cdot l_1}), \quad (11)$$

или в приближении будем иметь:

$$\frac{\partial I_{\phi n}}{\partial f} = \frac{\bar{\Phi}_u}{f}. \quad (12)$$

Из этого выражения следует, что чем больше фокусное расстояние приемника, тем меньше влияние разброса отклонений в фиксированном положении объектива оптической системы.

Для оценки влияния технологических погрешностей изготовления входного торца приемного световода и согласования других элементов продифференцируем выражение (10) по площади S_1 . Тогда получим:

$$\frac{\partial I_{\phi n}}{\partial S_1} = \frac{1}{\pi} \cdot P_{uu} \cdot K_c \cdot S_{\phi n} \cdot n_0 \cdot \Delta \bar{S}_i \cdot \frac{S_0 \cdot b_1}{f^2 \cdot \bar{g}_i \cdot \lambda} \cdot (e^{-\lambda \cdot l_0} - e^{-\lambda \cdot l_1}). \quad (13)$$

В целом на метрологию оптико-волоконного преобразования существенное влияние оказывают: юстировка объектива (разброс фокусного расстояния), погрешности формирования входного торца световода, колебания температуры и нестабильность источника излучения.

УДК 620.17.05
МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ УСТАНОВКИ
ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИЗГИБ

А. К. МАТВЕЕВ, Е. С. РЖАНАЯ, И. А. ПЕТЮЛЬ, К. С. МАТВЕЕВ
УО «ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

РИУП «НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПАРК ВИТЕБСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА»
Витебск, Беларусь

Из всего перечня продукции легкой промышленности, которыми пользуется каждый человек, наиболее важным изделием является обувь. В свою очередь, качество обуви зависит от большого количества составляющих, но, в первую очередь, от подошвы. В зависимости от того, насколько подошва соответствует требуемым критериям, будет зависеть сколько времени мы сможем носить обувь. Можно сказать, что такие критерии как износостойкость и стойкость на изгиб являются наиболее важными при оценке качества подошвенных материалов.

В данной работе проводились исследования в отношении такого параметра как испытание на изгиб. Связано это с тем, что в нормативной документации, которая действует на территории Республики Беларусь как метод испытаний, так и необходимое оборудование для испытания на изгиб, определены только для резин [1]. В то же время резиновые подошвы в настоящее время практически не используются. Как производители, так и потребители больше ориентируются на новые полимерные материалы, которые имеют привлекательный внешний вид, легкость и хорошие эксплуатационные показатели. Но эти показатели и не представляется возможным определить из-за отсутствия соответствующего оборудования и методик проведения испытаний.

Поиск оборудования, которое могло бы обеспечить проведение подобных испытаний, показал наличие «Устройства для испытания подошв на многоцикловой изгиб STM 465», производится фирмой SATRA (Англия) [2]. Использование устройства для испытания подошв на многоцикловой изгиб STM 465 позволяет определить сопротивляемость подошвенных материалов из синтетических полимеров к образованию трещин, их росту при определенной нагрузке на изгиб.

В результате анализа конструктивных особенностей устройства и тех задач, которые необходимо решать при проведении испытаний, было установлено, что устройство для испытания подошв на многоцикловой изгиб STM 465, наиболее точно воспроизводит условия нагружения и эксплуатации различных видов изделий из полимеров. Соответствующий стандарт

УДК 675.265:675.017
НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА
ИСКУССТВЕННЫХ КОЖ ДЛЯ ВЕРХА ОБУВИ

В. Д. БОРОЗНА, А. П. ДМИТРИЕВ, А. Н. БУРКИН
УО «ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
Витебск, Беларусь

Половина производимой обуви на белорусских предприятиях изготавливают из искусственной кожи (ИК). Использование ИК позволяет восполнить дефицит натуральной кожи. Однако, несмотря на широкое применение ИК, недостаточны знания об их физико-механических свойствах, а также отсутствие информации о структуре и сырьевом составе не позволяет производить конкурентоспособную продукцию.

В связи с растущим товарооборотом и высокой конкуренцией в отрасли легкой промышленности перед специалистами возник вопрос о необходимости проведения испытаний для оценки качества поступающего сырья. Для исследования деформационных свойств материалов применяют методики, описанные в ГОСТ 938.16-70, ГОСТ 29078-91, ISO 17695, ISO 3379. Однако данные методики имеют недостатки – это использование устройств к разрывным машинам, что увеличивает стоимость проведения эксперимента и не на всех предприятиях имеется данное оборудование, а также из-за невозможности замены пуансонов на устройствах ограничивает использование методик.

На кафедре «Стандартизация» УО «ВГТУ» была разработана методика и устройство для оперативного контроля качества материалов, позволяющие проводить испытания согласно отечественным и зарубежным стандартам. Внешний вид устройства, реализующего методику, представлен на рис. 1. Сущность методики заключается том, что испытываемый образец прижимается к шайбе верхнего зажима поджимной губкой, приводимой в движение вращением винтового упора. В случае необходимости, для большего сжатия материала можно воспользоваться ключом, вставляемым в отверстие на винтовом упоре. После закрепления образца в зажиме, поворачивая маховик 2, вдавливаем пуансон 3 в материал на необходимую величину, установленную экспериментально (диаметр пуансона выбираем в соответствии с ТНПА на метод испытания). Нагружение прекращаем при достижении необходимой величины деформации или разрушении образца. По шкале устройства определяем деформацию материала.

обработки, создание, на основе полученных зависимостей, алгоритмов и программ расчета оптимальных режимов обработки.

Решение поставленной задачи предполагает проведение усталостных испытаний материала деталей. Для их реализации разработана соответствующая методика. Взаимосвязь между технологическими условиями механической обработки и пределом выносливости исследовалась на характерном представителе группы конструкционных сталей – стали 40Х. Выбор данного материала определялся тем, что он используется для изготовления ответственных деталей на приборостроительных предприятиях, которые работают в условиях воздействия знакопеременных нагрузок и от их работоспособности в процессе эксплуатации зависит надежность работы всего изделия.

В результате проведенных экспериментальных исследований и их обработки методами многомерного регрессионного анализа получены математические модели, связывающие предел выносливости материала деталей и технологические условия окончательной чистовой обработки детали. Эти модели могут использоваться только для конкретных сочетаний обрабатываемого и инструментального материалов. С целью расширения возможностей применения полученных математических моделей разработана методика, которая учитывает реальные физико-механические характеристики и химический состав исследуемого материала.

Таким образом, полученные математические модели можно успешно применять для прогнозирования и обеспечения значений предела выносливости для любой детали, изготовленной из материала данной классификационной группы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иванов, Ю. И.** Обоснование критерия усталости на основе расчета объемного напряженно-деформированного состояния объекта / Ю. И. Иванов // Справочник. Инженерный журнал. – 2009. – № 5. – С. 22–26.
2. **Березин, И. Я.** Сопротивление материалов. Усталостное разрушение металлов и расчеты на прочность и долговечность при переменных напряжениях : учеб. пособие / И. Я. Березин, О. Ф. Чернявский; под общ. ред. О. Ф. Чернявского. – Челябинск : Изд. ЮУрГУ, 2002. – 47 с.
3. **Урядов, С. А.** Влияние технологий абразивной обработки на сопротивление усталости деталей машин / С. А. Урядов // Справочник. Инженерный журнал. – 2009. – № 9. – С. 8–11.

Е-mail: BarandichK@ukr.net
vsp1@ukr.net

ТМ 161 (соответствующий EN ISO 20344:8.4, DIN 53543) является наиболее надежным и достоверным.

При анализе конструкции установки было определено, что горизонтальное расположение узлов, обеспечивающих изгиб подошв, имеет определенный недостаток, который заключается в невозможности крепления подошв целиком. Для проведения испытаний необходимо либо отрезать каблуки, либо вырезать из подошвы пластины.

В результате проработки параметризованной 3D-модели конструкции узла нагружения испытательного устройства (показан на рис. 1), были установлены наиболее оптимальные конструктивные параметры и принято решение расположить узлы изгиба не в горизонтальной, а в вертикальной плоскости. Указанное расположение узла позволяет проводить испытания не нарушая целостности подошв.

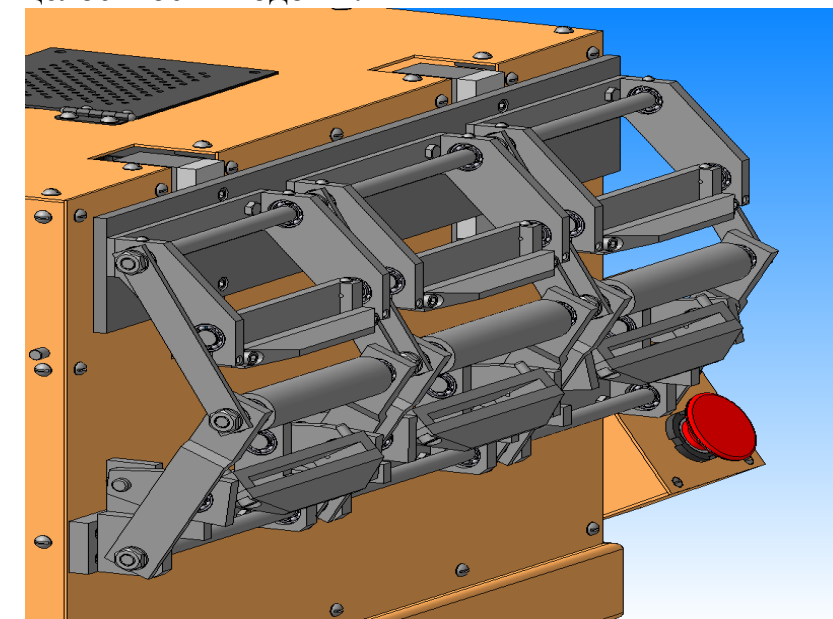


Рис. 1. Внешний вид узла нагружения испытательного устройства

После проработки кинематической схемы была разработана конструкция установки, внешний вид которой показан на рис. 2. Разработанная конструкция установки учитывает специфику стопы как органа опоры и движения, позволяет воссоздать среду эксплуатации обуви.

В устройстве радиус ролика соответствует радиусу кривизны низа обуви в пучковой части при ходьбе. Закрепление образца подошвы выполняется в вытянутом положении, располагая прокол в пучках в зоне максимальной нагрузки на изгиб, то есть внутренняя сторона подошвы по линии пучков должна располагаться на ролике. Носочная часть образца подошвы закрепляется в подвижном носочном зажиме, а пяточная часть в неподвижном пяточном зажиме. Затем установка закрывается полимерным кожухом.

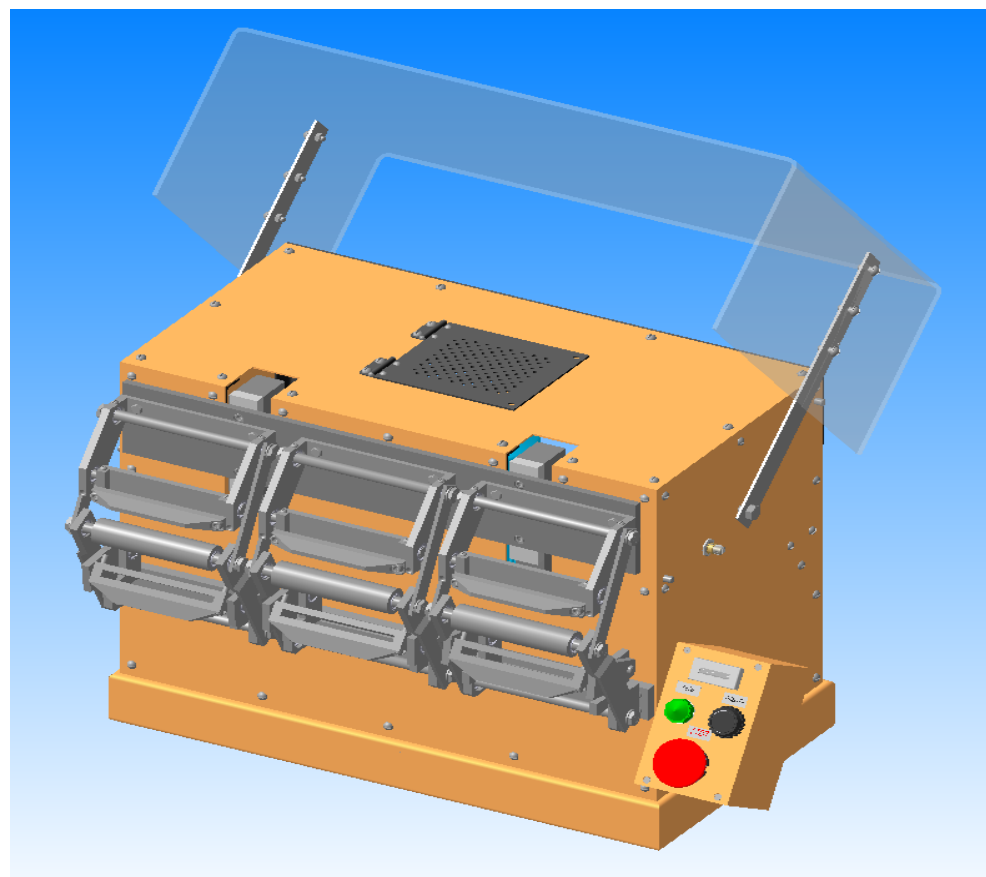


Рис. 2. Разработанная параметризованная 3D-модель установки

На счетном устройстве устанавливается количество изгибов и проводится пуск установки. В ходе испытания изгиб образца подошвы производится под углом 90° вокруг ролика. Процесс образования трещин с ходовой поверхности испытываемых подошв исследуется при многократном изгибе после 10, 20 и 30 тыс. циклов.

Таким образом, в результате анализа конструкции посредством параметризованной твердотельной модели, были учтены все недостатки аналога и разработана конструкция установки, позволяющая проводить испытания на изгиб различных полимерных материалов. В настоящий момент установка изготовлена и проходит испытания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 422-75.** Резина для низа обуви. Методы испытаний на многократный изгиб. – Введ. 1977-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 2002. – 7 с.
2. Satra technology centre // [Электронный ресурс] – Режим доступа http://www.satra.co.uk/bulletin/article_view.php?id=217. – Дата доступа 3.03.2014.

E-mail: konstant_m@tut.by

УДК 621.7.01:539.431

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПРИБОРОВ И МАШИН

Е. С. БАРАНДИЧ, С. П. ВЫСЛОУХ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ УКРАИНЫ
«КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»
Киев, Украина

Усталость как процесс накопления повреждений в условиях циклического воздействия переменных напряжений – одна из наиболее распространенных причин разрушения ответственных деталей машин и приборов при эксплуатации [1]. Наиболее опасным видом усталости является многоцикловая усталость. Это обусловлено тем, что уровень переменных механических напряжений в детали, которые приводят их к разрушению, значительно ниже предела текучести ($\sigma_{\max} \leq 0,6\sigma_T$) [2]. В макрообъеме материал деформируется упруго. Однако в связи с тем, что поверхностный слой реальных деталей имеет определенные характеристики: шероховатость, глубину и степень упрочнения, остаточные напряжения, а также дефекты в виде включений, царапин, пор и т. д., таким образом при упругом деформировании большого объема материала детали в микрообъемах происходит локальное знакопеременное пластическое деформирование, которое называется микропластическим. Его многократное повторение приводит к зарождению микроскопических трещин в поверхностном слое детали, постепенному их развитию, объединению и затем к внезапному разрушению детали. Численно многоцикловую усталость можно характеризовать пределом выносливости (пределом усталости) [3].

Значение предела выносливости материала детали зависит не только от его физико-механических характеристик, величины максимального напряжения, числа циклов, габаритных размеров детали, наличия концентраторов напряжения, но и во многом определяется качеством поверхностного слоя. Формирование поверхностного слоя выполняется, в основном, на этапах механической обработки. При этом имеет место технологическая наследственность состояния поверхностного слоя от отдельных технологических операций и всего технологического процесса изготовления детали. Однако, в связи с тем, что многие ответственные детали перед окончательной чистовой обработкой подвергаются термической обработке, определяющее значение при формировании качества поверхностного слоя деталей имеет именно чистовая обработка. Таким образом, актуальной является задача прогнозирования и обеспечения необходимых значений предела выносливости материала деталей путем разработки математических зависимостей предела выносливости от технологических факторов чистовой

METHODS OF WEAR CONDITIONS BEARING ALLOY OF SPLIT
BUSHINGS WHICH ARE APPLIED IN TURBINES

JERZY JAROSZEWICZ, LESZEK RADZISZWSKI, ŁUKASZ DRAGUN
Białystok University of Technology Poland
Kielce University of Technology Poland

Investigation methods of wear conditions bearing alloy of split busings which are applied on turbines, generators, pumps and forced-draught tan have presented in this paper. Considering split bearings have steel or cast steal base and have been roughing or fisting surface treatment. The visual, penetration, ultrasonic methods and surface roughness measurement of investigation have been considered. For visual investigations were used magnifier with magnification 2–4 times, for penetration testing- the colored penetrates known producers, for ultrasonic investigations were used cameras, for example type UNIPAN 510, UNIPAN 514 or Krautkramera adjustable boost with an accuracy of ± 1 dB, METRISON M610 and for fisting surface treatment-profilografometr Hommel Tester T1000. Minimal diameter of the slide bearing bushing should be contact with curve bearing bushing by means presented methods. Presented results of investigation conditions after ultrasonic treatment concern was capable for diameter split busings and thickness of alloy bearing not higher than 2 mm.

In article one introduced {one represented} description of technology sliding of pressing diamond - and one talk overed possibility her uses to finishing off toolings of paths {of} measuring - twitches relative and extensions {of} relative ram part, on gelding of rotor machines, with, aim {target} of obtainment of paths about better features than obtained with traditional methods.

УДК 677.017.636.2

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ
ДЛЯ ВОДОЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЫ

Д. К. ПАНКЕВИЧ, А. Н. РАДЮК, А. Н. БУРКИН
УО «ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
Витебск, Беларусь

Анализ условий эксплуатации материалов с целью выявления и систематизации технических требований к ним для водозащитной одежды, дифференцированных по назначению и области её использования, является целью этой работы. Выявление необходимого и достаточного количества показателей для оценки качества водозащитных материалов позволит определить те из них, которыми можно управлять на стадии производства материалов.

В рамках любой области использования одежды существуют ситуации, требующие защиты человека от воздействия атмосферных осадков различной интенсивности. Рассмотрим погодные условия, при которых эксплуатируется одежда, как комплекс факторов, воздействующих на материалы, из которых она изготовлена. Основными являются факторы: температура, смачивание, давление, удар, назовем их внешними, поскольку они не зависят от носчика и действуют на материал извне.

В зависимости от области использования одежды, человек, совершая движения, подвергает материалы воздействиям большей или меньшей интенсивности, выделяет тепло и пот в пространство под одеждой. Многократный изгиб, кручение, растяжение, сжатие, давление, трение, температура и влажность пространства под одеждой – эти факторы условно обозначим как внутренние, то есть зависящие от характера деятельности носчика.

Оценка качества материалов базируется на установлении степени соответствия свойств материала его назначению. В связи с этим можно утверждать, что приоритетные показатели качества материалов для водозащитной одежды также должны отражать степень устойчивости к внешним и внутренним воздействиям, оказываемым на материал в процессе эксплуатации. Согласно перечисленным внутренним и внешним факторам, были выбраны соответствующие им наиболее информативные показатели свойств материалов. В табл. 1 представлен перечень этих показателей.

Табл. 1. Показатели качества водозащитных материалов, отражающие устойчивость материалов к различным воздействиям

Вид воздействия	Условное обозначение	Показатель качества	Условное обозначение
Смачивание	С	водоотталкивание	ВО
Давление (гидростатическое)	Д	водонепроницаемость	ВН
Удар	У		
Многократный изгиб	И		
Растяжение	Р	Устойчивость к многоцикловым нагрузкам	МН
Сжатие	Сж		
Кручение	К		
Трение	Тр		
Температура пододежного пространства	Тп	Комплексный гигиенический	Г
Влажность пододежного пространства	Вп		

Интенсивность и наличие того или иного компонента внешних факторов определяется типом атмосферных осадков (морось, дождь, ливень, гроза, снег, град и т. д.), скоростью ветра (порыв, шквал, ураган), климатической зоной и временем года, а также длительностью эксплуатации одежды в неблагоприятных условиях.

Внутренние воздействия вполне предсказуемы для конкретных видов деятельности, обусловлены ею, а также антропометрическими особенностями человека, физико-механическими свойствами взаимодействующего с одеждой снаряжения, оборудования и т. п. Топография этих воздействий связана со строением тела человека и характерными для конкретного вида деятельности движениями и тоже вполне определяема. Заметим также, что с возрастанием физической нагрузки все внутренние факторы проявляют себя более интенсивно.

Погодные явления можно предсказать с определенной точностью, поэтому, чаще всего, человек в бытовой одежде в момент наиболее экстремального сочетания атмосферных явлений оказывается защищен более адекватными средствами, чем одежда. Поэтому бытовая одежда для защиты от атмосферных явлений предполагает невысокий уровень защиты, кратковременную потребность в защите (до ближайшего укрытия), при интенсивном воздействии внешних сил и более длительную – при умеренном, характерном для данного климатического пояса, воздействии.

Требования к бытовой одежде соответствующего назначения достаточно полно отражены в стандартах. Однако, в зависимости от волокнистого состава, различают количество и наименование контролируемых показателей качества, их нормативные значения и рекомендуемые методы определения. В отношении показателей качества материалов для специальной одежды, регламентируемых действующими стандартами, наблюда-

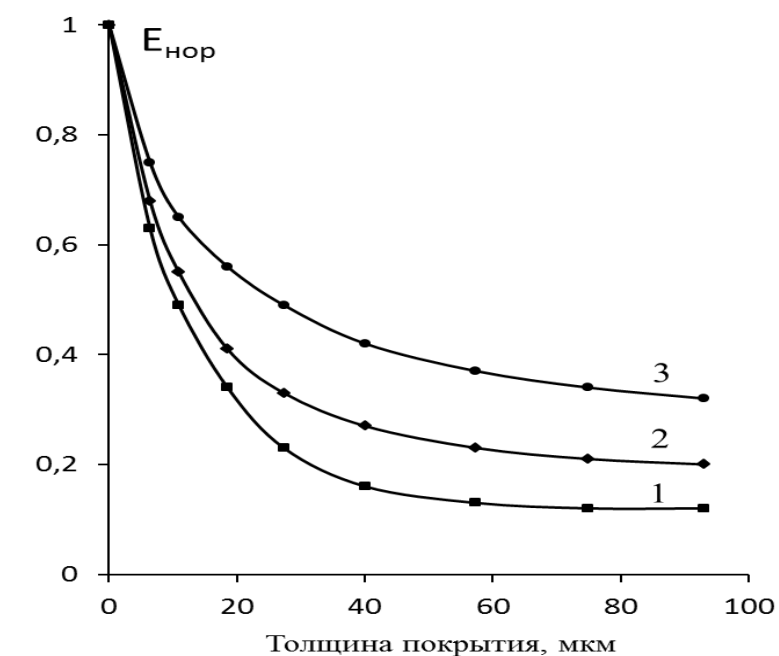


Рис. 1. Зависимость нормированных значений термоЭДС $E_{нор}$ от толщины никелевого покрытия на стали Ст20 при разном радиусе сферического окончания электрода: 1 – 0,05 мм; 2 – 0,5 мм; 3 – 1,5 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Суворов, Л. М.** Термоэлектрический метод измерения толщины гальванических покрытий / Л. М. Суворов // Заводская лаборатория. – 1964. – Т. 30 – № 8. – С. 959–962.
2. **Шарандо, В. И.** Перспективы термоэлектрического метода в исследовании свойств металлов и поверхностных слоев / В. И. Шарандо // Достижения физики неразрушающего контроля: сб. науч. тр., посвященный 40-летию ИПФ НАН Беларуси. – Минск, 2003. – С. 99–118.
3. **Шарандо, В. И.** Влияние формы электродов и контактной нагрузки при термоэлектрическом контроле никеля на стали / В. И. Шарандо // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 26–27 сент. 2012 г. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – С. 224–226.
4. Приборы термоэлектрические типа ПИТ / Ин-т прикл. физ. НАН Беларуси [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: <http://iaph.bas-net.by/~lab1/ru/pit.html>. – Дата доступа: 22.05.2014.

E-mail: lab1@iaph.bas-net.by

Табл. 1. Зависимость термоЭДС от толщины никеля на стали Ст20 при разном радиусе R сферического окончания электрода

Толщина покрытия, мкм	Измеренное значение термоЭДС, мкВ,		
	R = 0,05мм	R = 0,5мм	R = 1,5мм
0	+137	-245	+183
6,4	+86	-489	+81
10,9	+65	-585	+43
18,5	+44	-690	+5
27,3	+29	-750	-22
40,0	+20	-796	-51
57,3	+15	-820	-69
74,8	+14	-837	-81
93,0	+14	-845	-88
никель	-3	-996	-218

Табл. 1 иллюстрирует различную чувствительность к толщине покрытий при разных радиусах электродных окончаний. Однако сравнение полученных градуировок между собой и с рисунками работы [3], в которой использовались электроды из одного материала (Ст45), затруднено из-за большой разницы числовых значений при переходе от электрода к электроду, связанной с разницей термоэлектрических и теплофизических характеристик их материалов. В конструкции прибора эти вопросы решаются регулировкой коэффициента усиления и введением смещающих напряжений. Для получения унифицированных результатов проведено нормирование данных для каждого из электродов в границах диапазона показаний термоЭДС от материала основания до материала покрытия по формуле:

$$E_{\text{нор}} = (E - E_{\text{Ni}}) / (E_{\text{осн.}} - E_{\text{Ni}}),$$

где E_{нор} – нормированное значение термоЭДС; E – измеренное показание термоЭДС на данной толщине покрытия; E_{осн.} – показание на материале основания без покрытия; E_{Ni} – показание на массивном образце никеля.

На рис. 1 изображена зависимость нормированных значений термоЭДС E_{нор} от толщины никелевого покрытия на стали Ст20 при указанных выше радиусах окончаний электродов. Рисунок показывает, что при уменьшении радиуса окончаний электродов происходит возрастание чувствительности в начале диапазона толщин покрытий и её уменьшение – в конце. Для электродов с радиусом окончаний 0,05 мм контроль толщин покрытий свыше 60 мкм становится практически невозможным. Для шарика радиусом 1,5 мм чувствительность в конце диапазона является наибольшей, начальная чувствительность также достаточно высока. Из полученных результатов следует, что электроды с такой конфигурацией окончаний должны использоваться при конструировании толщиномеров.

ется большая согласованность. Материалы для спортивной одежды практически обделены нормативной базой. При таком положении дел не может быть проведена адекватная комплексная оценка качества водозащитных материалов.

В табл. 2 представлен анализ внешних и внутренних факторов, действующих на материалы для одежды в зависимости от условий её эксплуатации. Приоритетные показатели указаны в порядке убывания значимости. Знаками «+» и «-» отмечена интенсивность влияния того или иного фактора. Отсутствие знака в ячейке указывает на то, что, в данном случае, влиянием фактора решено пренебречь.

Табл. 2. Анализ внешних и внутренних факторов, действующих на водозащитную одежду в процессе эксплуатации

Класс одежды/ пример ассортимента	Назначение	Характеристика воздействия фактора		Внутренние факторы			Внешние факторы								Приоритетные показатели качества
		уровень	длительность	С	Д	У	И	К	Р	С	Д	Т	Т	В	
Бытовая/ плащ, куртка	для защиты от атмосферных осадков	низкий	+	+			+		+	+		+			ВО, Г, МН
		средний	-	+	+		+		+	+	+	+			ВН, МН
		высокий		+	+	+	+	+	+	+	+	+			
Специальная/ куртка, брюки	для защиты от общих производственных загрязнений	низкий	+	+			+	+	+	+	+	+	+	+	Г, МН, ВО,
плащ штормовка	для защиты от воды	средний	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	ВН, МН, Г
		высокий	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	ВН, МН
Спортивная/ куртка, брюки	Для тренировок в неблагоприятных погодных условиях	низкий	+	+			+	+	+	+	+	+	+	+	Г, ВО, МН
		средний	-	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	
		высокий	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	ВН, Г, МН
костюм рафтингиста	для защиты от воды	средний	-	+			+	+	+	+	+	+	+	+	ВО, Г, МН
		высокий	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	ВН, Г, МН

E-mail: dashapan@mail.ru
ana.r.13@mail.ru

В. И. ПОПЕЧИЦ
НИУ «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ПРИКЛАДНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ им. А. Н. Севченко» БГУ
Минск, Беларусь

Для проведения неразрушающего радиационного контроля структуры материалов и изделий используются различные источники ионизирующих излучений, методы, приборы и установки [1, 2]. Растворы органических красителей имеют интенсивные полосы поглощения в видимой области спектра [3], что определяет возможность их применения в качестве детекторов радиационной дозы. Под воздействием ионизирующего излучения происходит изменение цвета многокомпонентного раствора, зависящее от исходной концентрации и химической природы красителей, физико-химических свойств растворителя, радиационной дозы воздействовавшего на раствор ионизирующего излучения [4, 5].

Если между источником ионизирующего излучения и многокомпонентным жидким или твердым раствором красителей поместить материал или изделие, то изменение цвета раствора в определенном месте раствора будет коррелировать с величиной радиационной дозы, воздействовавшей на данный участок раствора и, следовательно, по цветовой структуре отпечатавшегося на растворе изображения материала или изделия можно судить о внутренней структуре объекта [5, 6]. Глаз человека точнее реагирует на изменение цвета, чем на изменение контраста черно-белого изображения (градации серого цвета) [7].

В работе исследованы спектрально-оптические и определенные физико-химические свойства необлученных и облученных многокомпонентных растворов красителей различных классов с целью создания на их основе регистрирующих сред, перспективных для неразрушающего радиационного контроля материалов и изделий. Растворы облучались на гамма-установке "МРХγ-25М", в которой в качестве источника гамма излучения используется ^{60}Co , а также на рентгеновской установке ДРОН 2 (напряжение на рентгеновской трубке – 22 кВ, электрический ток в трубке – 10 мА).

В идеальном случае многокомпонентные растворы красителей, регистрирующие ионизирующие излучения, должны иметь достаточно высокий радиационно-химический выход, который не должен зависеть, в широких пределах, от вида излучения, его энергии, концентрации реагентов, температуры и любых других условий, которые могут изменяться во время облучения исследуемого образца (рН раствора, содержание растворенных газов и т. п.). Кроме того, они должны быть достаточно стабильными до облучения и после него. Для практических применений желательно, чтобы

В. И. ШАРАНДО, А. А. ПОЛОНЕВИЧ
ГНУ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»
Минск, Беларусь

Одной из основных задач термоэлектрической толщинометрии покрытий [1, 2] является оптимизация чувствительности по контролируемому диапазону и повышение её в области больших толщин. Важнейшее значение при этом имеет размер контакта нагреваемого электрода с поверхностью изделия. В работе [3], посвящённой контролю никеля на стали Ст20, показано, что зависимости термоЭДС от толщины покрытия изменяются при изменении как площади плоских площадок на окончаниях нагреваемых электродов, так и усилия прижима сферического электрода к изделию. Это связано с перераспределением температурного поля в поверхностном слое изделия и изменением относительного вклада в суммарную ЭДС источников на границах электрод-покрытие и покрытие-основание.

Площадь контакта зависит также от радиуса сферы на окончании электрода. Причём здесь следует говорить об эффективном пятне нагрева, учитывающем изменение условий теплопередачи (теплопроводность воздуха, характеристики излучения и поглощения, конвекции) с изменением конфигурации тонкого зазора между электродом и покрытием в зоне непосредственной близости к краю механического контакта.

В данной работе исследовано влияние радиуса закругления окончания нагреваемого термоэлектрического электрода на градуировочные зависимости при контроле никелевых покрытий на стали Ст20 в диапазоне толщин $0 \div 100$ мкм. Целью исследований было определение условий повышения чувствительности.

При исследованиях использован термоэлектрический прибор типа ПИТ [4] с преобразователем, обеспечивающим возможность смены электродов; последние выполнялись из латуни с окончаниями в виде впрессованных стальных либо твердосплавных сферообразных элементов. Разность температур между нагреваемым электродом и контролируемым образцом составляла 50°C . Усилие прижима электрода 3 Н. Размер образцов $40 \times 40 \times 8$ мм, на верхнюю плоскость нанесено гальваническое покрытие.

В табл. 1 приведены значения измеренной термоЭДС в зависимости от толщины покрытия при радиусах R контактных окончаний электродов: 0,05 мм (закалённая стальная игла); 0,5 мм (твердосплавный шарик) и 1,5 мм (закалённый шарик из стали ШХ15). Включены результаты измерений на материале основания без покрытия и на массивном образце никеля.

Рассмотрим результат влияния вариаций величин μ_2 и σ_2 на характер зависимости $\Delta\varphi$ от d . На рис. 3 линия 1 аналогична линии 1 на рис.2, то есть соответствует случаю $\mu_2 = 80 = \mu_{20}$. При увеличении μ_2 на 25 %, то есть при $\mu_2 = 100$, зависимость $\Delta\varphi$ от d имеет вид, показанный линией 2 на рис. 3. Из сравнения рис. 2 и 3 видно, что влияние вариаций значения μ_2 на зависимость $\Delta\varphi$ от d значительно меньше, чем влияние на эту зависимость вариаций σ_1 . Если теперь предположить, что наряду с возрастанием μ_2 до значения 100 одновременно на 20 % увеличилась и величина σ_2 (то есть с 11,5 МСм/м до 13,8 МСм/м), то зависимость $\Delta\varphi$ от d практически снова станет такой же, которая представлена линией 1 на рис. 3.

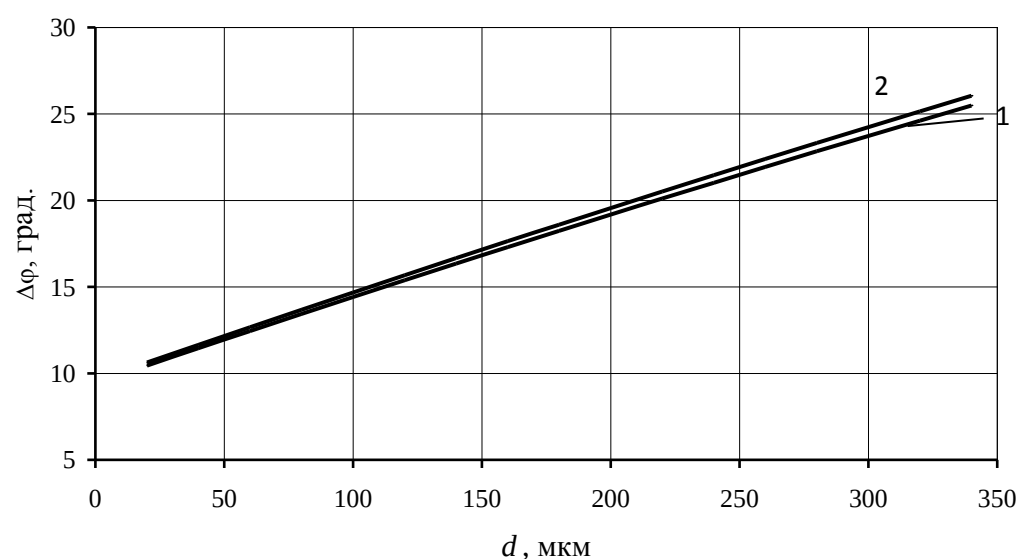


Рис. 3. Влияние вариации величины μ_2 на зависимость $\Delta\varphi$ от d при: 1 – $\mu_2 = 80 = \mu_{20}$; 2 – $\mu_2 = 100$

Из приведенных данных следует, что для повышения точности измерения толщины покрытия на основе анализа $\Delta\varphi$ необходимо, в первую очередь, учитывать величину его удельной электрической проводимости с целью осуществления корректировки при анализе результатов измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рубин, А. Л.** Реакция ферромагнитного полупространства с немагнитным слоем на датчик накладного типа / А. Л. Рубин, В. Г. Пахомов // Дефектоскопия. – 1974. – № 3. – С. 36–40.
2. **Соболев, В. С.** Накладные и экранные датчики / В. С. Соболев, Ю. М. Шкарлет. – Новосибирск : Наука, 1967. – 144 с.

E-mail: lab5@iaph.bas-net.by

для их приготовления можно было применять реактивы обычной степени чистоты и, чтобы аналитические методики для определения радиационно-химического превращения не были трудоемкими.

Простейшим многокомпонентным раствором является трехкомпонентный раствор, состоящий из растворителя и двух красителей, один из которых поглощает в длинноволновой области видимого спектра, а другой – в коротковолновой. При увеличении времени облучения раствора (дозы облучения) изменяется его цвет, приближаясь к цвету раствора более радиационно-стойкого красителя. При использовании трехкомпонентного раствора красителей в качестве регистрирующей среды для целей радиационного контроля необходимо, чтобы красители в данном растворе имели интенсивные электронно-колебательные полосы поглощения в видимой области спектра, хорошо растворялись в выбранном растворителе, химически не взаимодействовали друг с другом и с образующимися продуктами радиационной деструкции красителей, имели существенно различающиеся скорости радиационной деструкции (в этом случае изменения цвета соседних участков раствора будут наиболее чувствительны к изменению величин радиационной дозы, воздействовавших на эти участки), обладали низким фэдингом, т. е. чтобы изменения цвета облученных участков раствора после прекращения воздействия радиации были минимальными.

На рис. 1 в полулогарифмическом масштабе представлена зависимость нормированной интенсивности поглощения в максимуме длинноволновых полос поглощения красителей от времени облучения трехкомпонентного раствора.

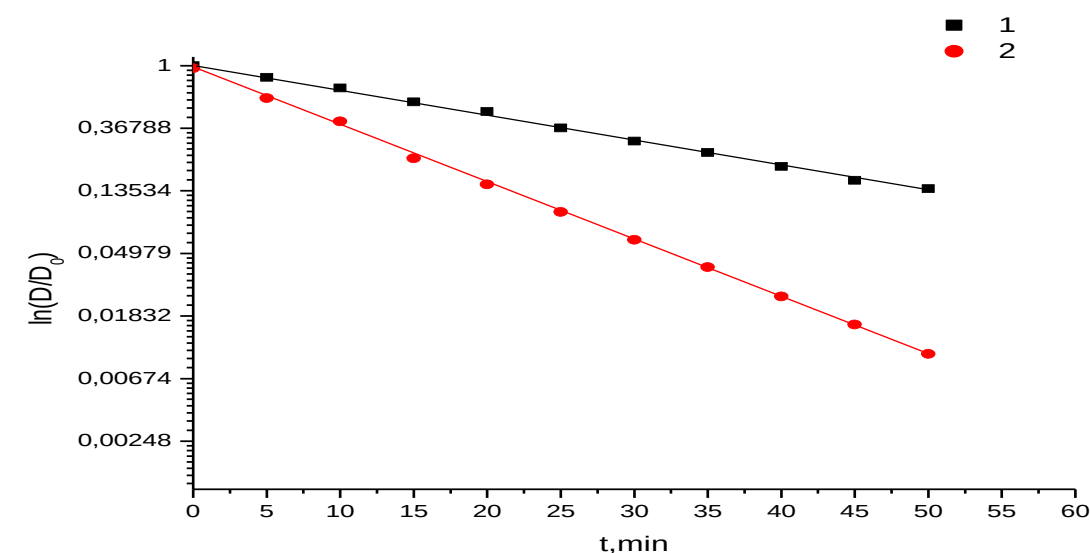


Рис. 1. Зависимость нормированной интенсивности поглощения в максимуме длинноволновых полос раствора триафлавина (1) + малахитовый зеленый (2) в воде от времени облучения раствора. Мощность экспозиционной дозы облучения – 0,63 Гр/с

Исходя из критериев отбора многокомпонентных водных растворов красителей для целей неразрушающего радиационного контроля, а именно: хорошая растворимость красителей в воде, большие коэффициенты экстинкции красителей в видимой области спектра, отсутствие химического взаимодействия красителей в растворе между собой и с продуктами радиационной деструкции красителей, сильно различающиеся скорости радиационной деструкции красителей в растворе, низкий фэдинг и т. д., были подобраны определенные пары красителей и проведенные испытания с различными тестовыми структурами (тестовые структуры накладывались на растворы красителя и облучались на рентгеновской установке ДРОН 2) показали, что данные многокомпонентные растворы вполне пригодны для использования в качестве визуализаторов жестких излучений при проведении неразрушающего контроля материалов и изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пикаев, А. К. Современная радиационная химия. Основные положения. Экспериментальная техника и методы / А. К. Пикаев. – М. : Наука, 1985. – 375 с.
2. Попечиц, В. И. Визуализаторы ионизирующих излучений на основе растворов арилметановых красителей / В.И.Попечиц // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Минск : НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ, 2011. – С. 57–58.
3. Бахшиев, Н. Г. Введение в молекулярную спектроскопию / Н. Г. Бахшиев. – Л. : Изд. ЛГУ, 1987. – 215 с.
4. Попечиц, В. И. Визуализаторы ионизирующего излучения на основе многокомпонентных растворов красителей / В. И. Попечиц // Проблемы инженерно-педагогического образования в Республике Беларусь: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. – Минск : БНТУ, 2012. – С. 128–133.
5. Попечиц, В. И. Неразрушающий контроль материалов и изделий с помощью многокомпонентных растворов красителей / В. И. Попечиц // IV Конгресс физиков Беларуси: сб. науч. тр. НАН Беларуси. – Минск, 2013 – С. 200–201.
6. Попечиц, В. И. Дефектоскопия материалов и изделий с помощью многокомпонентных растворов красителей / В. И. Попечиц // Достижения физики неразрушающего контроля: Сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Минск : Институт прикладной физики НАН Беларуси, 2013. – С. 284–289.
7. Цвет в ЖК дисплее, модели цвета, цветовосприятие / Л. В. Кухарчик [и др.]. – Минск : Изд. БГУ, 2003. – 199 с.

E-mail: Papechyts@bsu.by

значение $\sigma_1, \sigma_2 = 11,5 \text{ МСм/м}$, $\mu_2 = 80$ (обозначим его $\mu_2 0$), что примерно соответствует электропроводности и относительной магнитной проницаемости никеля. Амплитудное значение тока возбуждения принято равным 1 А, радиусы обоих витков равны 0,002 м, $h = 0,001 \text{ м}$, измерительный виток расположен на расстоянии $h/2$ от поверхности образца. Расчет проведен при частоте поля возбуждения 20 кГц. Полученная зависимость представлена на рис. 2 линией 1, при этом $\Delta\varphi$ обозначает приращение фазы вносимой ЭДС преобразователя относительно фазы этой ЭДС, соответствующей случаю $d = 0$.

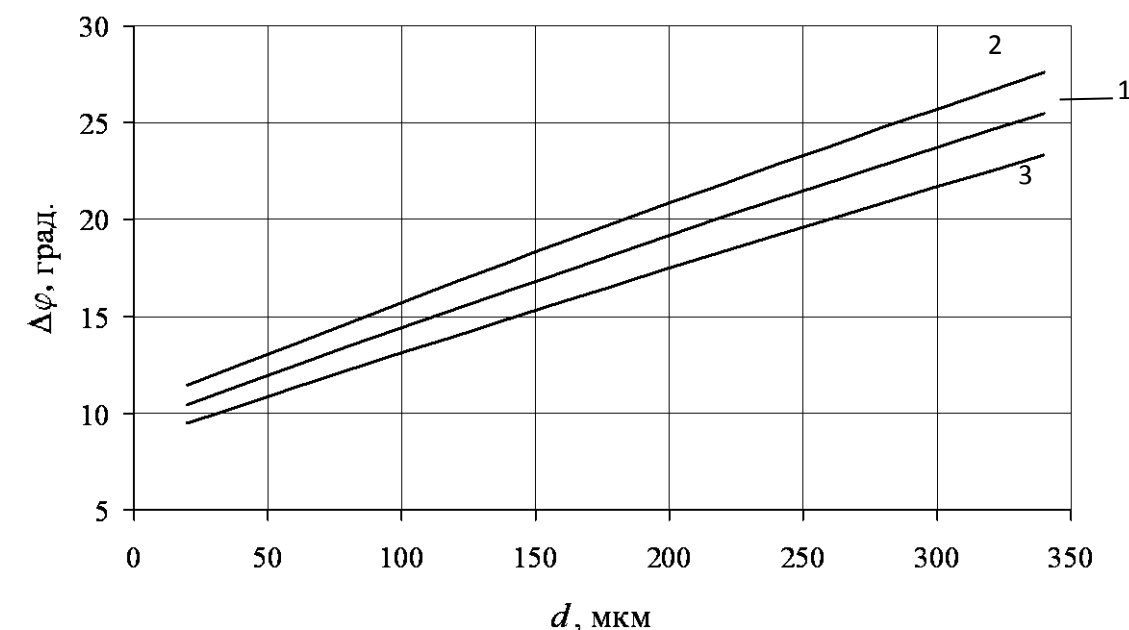


Рис. 2. Влияние вариаций величины σ_1 на зависимость $\Delta\varphi$ от d : 1 – $\sigma_1 = \sigma_1 0 = 5,26 \text{ МСм/м}$; 2 – $\sigma_1 = 5,786 \text{ МСм/м}$; 3 – $\sigma_1 = 4,734 \text{ МСм/м}$

Из рис. 2 видно, что зависимость $\Delta\varphi$ от d практически линейна, что соответствует известному результату – $\varphi = k\mu_0\sigma_1\omega dR$, где k – коэффициент пропорциональности, ω – угловая частота поля возбуждения [1]. Из [1] также известно, что k зависит от R, h, σ_1, σ_2 и μ_2 . Рассмотрим характер зависимости $\Delta\varphi$ от d при вариациях величин σ_1, σ_2 и μ_2 . Был проведен расчет при $\sigma_1 = 5,786 \text{ МСм/м}$, что на 10 % больше величины $\sigma_1 0$ (при прежних всех остальных параметрах), в этом случае зависимость $\Delta\varphi$ от d имеет вид, представленный линией 2 на рис. 2. При $\sigma_1 = 4,734 \text{ МСм/м}$, что на 10 % меньше величины $\sigma_1 0$, зависимость $\Delta\varphi$ от d имеет вид, представленный линией 3 на том же рисунке. Видно, что вариации σ_1 оказывают существенное влияние на точность определения d – при изменении σ_1 на 10 % относительно первоначального значения $\sigma_1 0$ (при неизменной толщине покрытия, равной d_0) отклонение определенного по результатам измерения $\Delta\varphi$ значения d от истинного d_0 превышает 10 %.

ВЛИЯНИЕ ВАРИАЦИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВУХСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЫ НА ФАЗУ ВНОСИМОЙ ЭДС НАКЛАДНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ВИХРЕТОКОВОГО ТОЛЩИНОМЕРА

А. В. ЧЕРНЫШЕВ

ГНУ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»
Минск, Беларусь

При контроле вихретоковым толщиномером с накладным преобразователем двухслойной структуры, состоящей из проводящего немагнитного покрытия на проводящей магнитной основе (подложке), наиболее эффективным является контроль, основанный на измерениях фазы φ вносимой ЭДС накладного преобразователя [1]. На практике обычно наблюдаются вариации величин удельных электрических проводимостей покрытия σ_1 и основы σ_2 , а также относительной магнитной проницаемости основы μ_2 в различных точках образца. Это приводит к вариациям величины φ при неизменном значении толщины покрытия d , что уменьшает точность определения d .

В докладе приведены результаты численных расчетов зависимости фазы вносимой ЭДС измерительной катушки преобразователя от толщины верхнего слоя двухслойной структуры, полученные при различных значениях σ_1 , σ_2 и μ_2 . Расчет проведен по аналитическим выражениям [2]. Схема расположения витков преобразователя над двухслойной структурой показана на рис. 1.

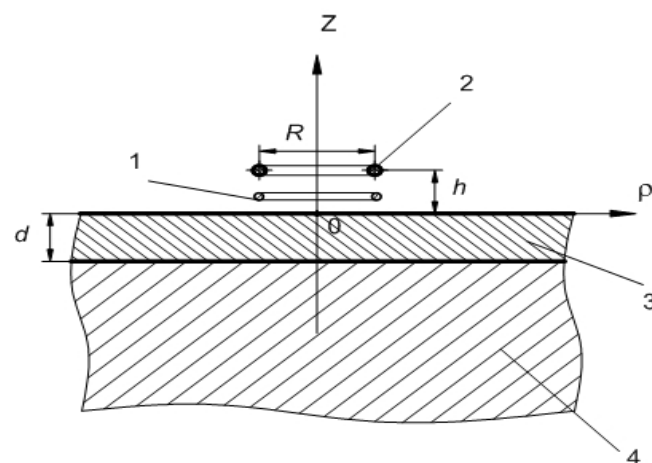


Рис. 1. Витки над проводящей двухслойной средой: 1 – измерительный виток; 2 – виток поля возбуждения; 3 – проводящее покрытие; 4 – проводящая магнитная подложка

Сначала расчет проведен при следующих значениях: $\sigma_1 = 5,26 \text{ МСм/м}$ (что примерно соответствует электропроводности хрома, обозначим это

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ АНИЗОТРОПИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ИЗДЕЛИИ

А. И. ПОТАПОВ

ФГБОУ ВПО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ
УНИВЕРСИТЕТ «ГОРНЫЙ»
Санкт-Петербург, Россия

Одним из достоинств композитов как конструкционных материалов является то обстоятельство, что в этих материалах можно закладывать необходимые параметры физико-механических свойств в любом направлении и участке изделия в процессе его изготовления. Управление свойствами композиционных материалов осуществляется в результате выбора оптимальных технологических режимов или путем регулирования содержания и ориентации наполнителя в определенных структурных направлениях. При этом в композиционных материалах с направленной ориентацией анизотропия зависит от способа укладки стеклопакетов с заложенной ориентацией волокна.

В композиционных материалах на основе рубленого волокна ориентация наполнителя может происходить самопроизвольно, что приводит к неравномерной анизотропии в различных участках изделия. Кроме того, в процессе формования изделий из композиционных материалов может происходить смещение, раздвижка и поворот наполнителя, что приводит к изменению заложенной анизотропии.

Для оценки и неразрушающего контроля установившейся анизотропии наиболее оптимальным является импульсный ультразвуковой метод. С помощью этого метода можно определить как преобладающую ориентацию наполнителя, так и анизотропию композиционного материала. При этом направление с максимальными значениями физико-механических свойств совпадают с направлением преобладающей ориентации наполнителя.

Большинство типов композиционных материалов, обладающих существенной анизотропией, являются ортогонально-анизотропными, т. е. волокна расположены в двух взаимно перпендикулярных направлениях, совпадающих с направлением осей упругой симметрии.

Подобные композиционные материалы относят к продольно-поперечной структуре (ППС). Максимальной анизотропией и степенью ориентации обладает однонаправленный композиционный материал.

В результате экспериментально-теоретических исследований композиционных материалов продольно-поперечной структуры установлено, что степень анизотропии скорости продольных волн в однонаправленном ком-

позиционном материале – величина постоянная и не зависит от содержания наполнителя в диапазоне 50–80 %.

Используя импульсный ультразвуковой метод, представляется возможным непосредственно в изделии из композиционного материала ППС определить степень ориентации по следующей формуле:

$$m = \frac{\lambda_0 \lambda_{\text{пп}} - 1}{\lambda_0 \lambda_{\text{пп}} - \lambda_{\text{пп}} + \lambda_0 - 1}, \quad (1)$$

где $\lambda_0 = v_0/v_{90}$ – степень анизотропии скорости продольных волн в однонаправленном композиционном материале; $\lambda_{\text{пп}}$ – степень анизотропии скорости в исследуемом композиционном материале ППС; v_0 и v_{90} – скорость продольных волн вдоль и поперек волокон.

Следует отметить, что значение $\lambda_{\text{пп}}$ определяется экспериментально путем измерения скорости продольных волн в двух направлениях: вдоль и поперек волокон. Определение степени ориентации наполнителя в неориентированных композиционных материалах является значительно более трудной задачей. Расположение рубленого наполнителя в неориентированном композиционном материале зависит от режима технологии изготовления, конфигурации и габаритов изделия, длины волокна и других факторов.

Существенное влияние на физико-механические свойства неориентированных композиционных материалов оказывает ориентация наполнителя. Наиболее эффективным методом контроля степени ориентации в этих материалах также является импульсный ультразвуковой метод.

Для определения степени ориентации наполнителя в неориентированных композиционных материалах предлагается следующая зависимость:

$$q = \frac{(\lambda_0 + 1)(\lambda_x - 1)}{(\lambda_0 - 1)(\lambda_x + 1)}, \quad (2)$$

где λ_0 и λ_x – степень анизотропии скорости продольных волн в однонаправленном и неориентированном композиционных материалах.

Данное выражение получено на основании предпосылки, что однонаправленная структура обладает 100-процентной степенью ориентации, и степень анизотропии скорости однонаправленного композиционного материала не изменяется в диапазоне содержания наполнителя, равном 45–85 %. Теоретическое значение степени анизотропии однонаправленного композиционного материала составляет 1,67. Тогда данное выражение (2) можно упростить:

$$q = \frac{4(\lambda_x - 1)}{\lambda_x + 1}. \quad (3)$$

Следует отметить, что степень ориентации в неориентированных композиционных материалах определяется при прозвучивании не менее чем в трех структурных направлениях, в то время как в ориентированных компо-

возможности такого подхода были протестированы на простейшей структуре – алюминиевая пленка на подложке. Параметры металлического слоя (комплексный показатель преломления и толщина), толщина которого может составлять 1...5 нм, определяют путем обработки угловой зависимости коэффициента отражения лазерного пучка от поверхности исследуемой структуры. Параметры (комплексный показатель преломления $n = x_2 + ix_3$ и толщина x_1) металлической пленки могут быть определены путем минимизации целевой функции

$$I = \sum_{j=1}^n [f(x_i, \gamma_j) - R(\gamma_j)]^2,$$

где $f(x_i, \gamma_j)$ – теоретическая модель коэффициента отражения.

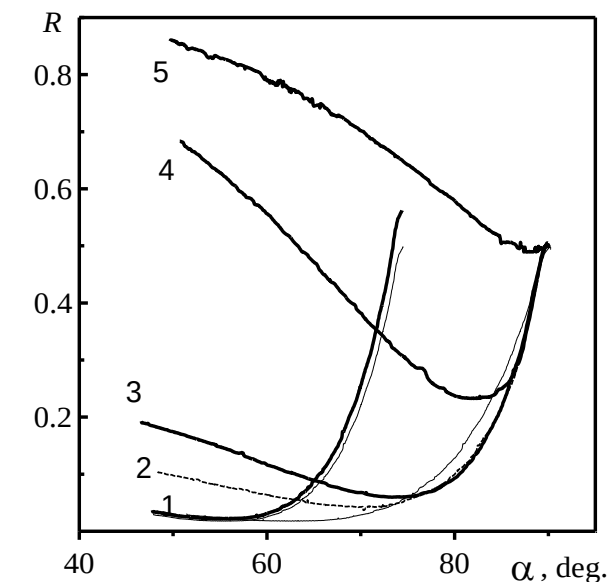


Рис. 3. Угловая зависимость коэффициента отражения $R(\gamma)$ лазерного излучения от поверхности алюминиевой пленки разной толщины

Угловые зависимости коэффициента отражения пучка He-Ne лазера ТМ-поляризации, измеренные при его отражении от осажденных методом термического напыления на подложку слоев алюминия толщиной 2 (кривая 1), 3 (кривая 2), 5 (кривая 3), 18 (кривая 4) и 26 нм (кривая 5) и представленные на рис. 3, иллюстрируют эффективность предлагаемого подхода. Следует отметить, что данная техника позволяет контролировать и состояние поверхности металлического слоя.

Анализ приведенных данных показывает, что данный метод, будучи гораздо более простым в приборной реализации, обеспечивает точность результатов, сопоставимую с данными многоугловой эллипсометрии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Khomchenko, A. V.** Waveguide spectroscopy of thin films / A. V. Khomchenko. – New York. – Academic Press. – 2005.

Показано, что для пленок металла толщиной в диапазоне от 5 нм до 0,2 мкм, предлагаемый подход достаточно эффективен (погрешности восстановления параметров не превышают 10 %).

При измерении параметров металлических пленок было замечено, что погрешность измерений уменьшается при увеличении толщины буферного слоя, что позволило предложить отказаться от использования призмы связи в установке для волноводной спектроскопии (считая толщину буферного слоя бесконечно большой). Принципиальная схема установки для измерения распределения $R(\gamma)$ приведена на рис. 2.

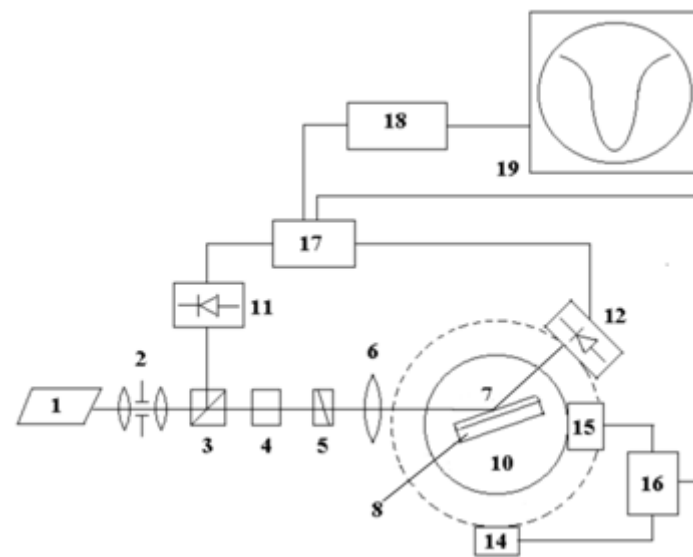


Рис. 2. Схема установки для измерения угловой зависимости коэффициента отражения светового пучка: 1 – источник излучения; 2 – коллиматор; 3 – делитель пучка; 4 – аттенюатор; 5 – поляризатор; 6 – линза; 7 - тонкопленочная структура на подложке 8; 10 – поворотный столик; 11 и 12 – фотоприемники; 14 и 15 - шаговые двигатели; 16 – блок синхронного управления шаговыми двигателями; 17 – блок сравнения каналов; 18 – аналогово-цифровой преобразователь; 19 – компьютер

Лазерный пучок падает на тонкопленочную структуру, установленную на поворотном столике. Угол падения пучка на образец изменяется с помощью шагового двигателя. Зависимость $R(\gamma)$ регистрируется фотоприемником, синхронно перемещаемым вторым шаговым двигателем, при измерении мощности светового пучка, отраженного от образца контролируется и мощность падающего пучка (блок управления двигателями синхронизирован с блоком сравнения каналов). После цифровой обработки сигнал поступает в оперативную память компьютера. Измерения проводились с использованием лазерного пучка ТМ-поляризации с длиной волны 633 нм, шаг дискретизации угла γ составлял 20 секунд.

зиционных материалах достаточно провести испытания в двух взаимно перпендикулярных направлениях, совпадающих с направлением волокон.

Полученные выражения (1–3) предполагают определение интегральной степени ориентации, т. е. усредненное значение относительного количества наполнителя с ориентацией вдоль соответствующего структурного направления, совпадающего с направлением испытания.

Для определения локальной ориентации наполнителя или определения направления преобладающей анизотропии материала могут быть использованы поляризационные методы. Наиболее эффективными в этом отношении могут быть ультразвуковые, микрорадиоволновые и инфракрасные поляризационные методы.

Применение этих методов основано на вращении плоскости поляризации излучения, прошедшего через анизотропную среду, в исследуемом участке среды. При этом интенсивность прошедшего или отраженного излучения (ультразвукового или электромагнитного) зависит от угла между направлением преобладающей ориентации и направлением поляризации волны в поляризаторе и анализаторе. Интенсивность прошедшего излучения через изотропную среду или в воздухе, при скрещенных поляризаторе и анализаторе, равно 0 или зависит от степени и вида поляризации используемого излучения и состояния среды.

В общем случае интенсивность прошедшего поляризованного излучения при повороте скрещенных поляризатора и анализатора выглядят так:

$$I = I_0 \sin^2 2\alpha \sin^2 \frac{\delta}{2}, \quad (4)$$

где I_0 – интенсивность падающего поляризованного излучения после поляризатора; α – угол между направлением плоскости поляризации волны в поляризаторе и направлением преобладающей ориентации наполнителя; δ – разность фаз.

Значение разности фаз можно найти при известных значениях скоростей распространения волн (упругих или электромагнитных) вдоль соответствующих направлений в поляризаторе и анализаторе:

$$\delta = \frac{2\pi h}{\lambda} \left(\frac{v_0}{v_2} - \frac{v_0}{v_1} \right), \quad (5)$$

где h – толщина исследуемой среды; λ – длина волны излучения; v_0 – скорость распространения поляризованного излучения в воздухе или в материале акустического контакта для ультразвука; v_1 и v_2 – скорости поляризованного излучения (для ультразвука – скорости поперечных волн) вдоль направления с преобладающей ориентацией и перпендикулярно к нему.

Произведя несложные преобразования в формулах (4, 5), получим следующее выражение для определения α :

$$\alpha = \frac{1}{2} \arcsin \sqrt{\frac{I}{I_0 \sin^2 \frac{\pi h}{\lambda} \left(\frac{v_0}{v_2} - \frac{v_0}{v_1} \right)}} \quad (6)$$

Таким образом, зная h и λ , а также измерив, интенсивность излучения после поляризатора и анализатора и значения соответствующих скоростей, получим направление преобладающей ориентации наполнителя в композиционных материалах.

Экспериментальное определение степени ориентации производилось на ориентированных и неориентированных композиционных материалах типа – стеклопластик. Для проведения испытаний и экспериментальной проверки формулы были изготовлены ориентированные стеклопластики на основе эпоксифенольного связующего ИФ-ЭД-6 кг с различным соотношением волокон в продольном и поперечном направлениях, с весовым содержанием стекла 75 %.

Ультразвуковые испытания проводились на плитах размером 500×500 ×5 мм по ранее приведенной методике. Результаты ультразвуковых испытаний и расчетов приведены в табл. 1.

Табл. 1. Значения ориентации стеклонаполнителя в стеклопластиках, с продольно-поперечной укладкой волокна

Тип стеклопластиков	Скорость про- дольных волн, м/с		Степень анизотропии скорости	Относительное содержание во- локна с ориентацией в направле- нии			
	вдоль волокон	поперек волокон		продольном		поперечном	
				экспе- римен- тально	по паспор- ту	экспе- римен- мен-	по паспорту
1:1	4250	4220	1,005	0,500	0,500	0,500	0,500
1:2	4510	3900	1,155	0,656	0,667	0,344	0,333
1:3	4630	3760	1,231	0,726	0,750	0,274	0,250
1:4	4680	3700	1,264	0,756	0,800	0,244	0,200
1:5	4700	3640	1,291	0,770	0,833	0,230	0,167
1:10	4920	3500	1,405	0,867	0,909	0,133	0,091
1:15	4980	3370	1,477	0,920	0,938	0,080	0,062
Однонаправлен- ные	5100	3200	1,594	1,00	1,00	0,00	0,00

Из табл. 1 видно, что экспериментальные значения ориентации незначительно отличаются от паспортных характеристик. Для оценки анизотропии скорости продольных волн и модуля упругости также проводились ультразвуковые испытания выше указанных плит путем их прозвучивания под углом 15° к направлению стекловолокна.

Результаты исследования анизотропии скорости продольных волн

УДК 535.32: 621.378
РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ
НАНОРАЗМЕРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЕВ НА ПОДЛОЖКЕ

А. В. ХОМЧЕНКО, И. У. ПРИМАК, И. А. КОРНЕЕВА,
*Н. И. СТАСЬКОВ, **Н. А. КРЕКОТЕНЬ
ГУ ВПО «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
*УО «МОГИЛЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. А. А. Кулешова»
**НТЦ «БЕЛМИКРОСИСТЕМЫ» ОАО «ИНТЕГРАЛ»
Могилев, Минск, Беларусь

Оптический контроль параметров наноразмерных металлических слоев представляет определенный интерес для микроэлектроники. Одним из методов диагностики металлических слоев является ПЭВ-спектроскопия, основанная на обработке угловой зависимости коэффициента отражения светового пучка $R(\gamma)$ при возбуждении плазмонных мод. Для измерения $R(\gamma)$ обычно используется установка, принципиальная схема которой приведена в [1]. В работе представлены результаты измерения для пленок из алюминия и золота. Полученные зависимости $R(\gamma)$ для пленки Au приведены на рис. 1.

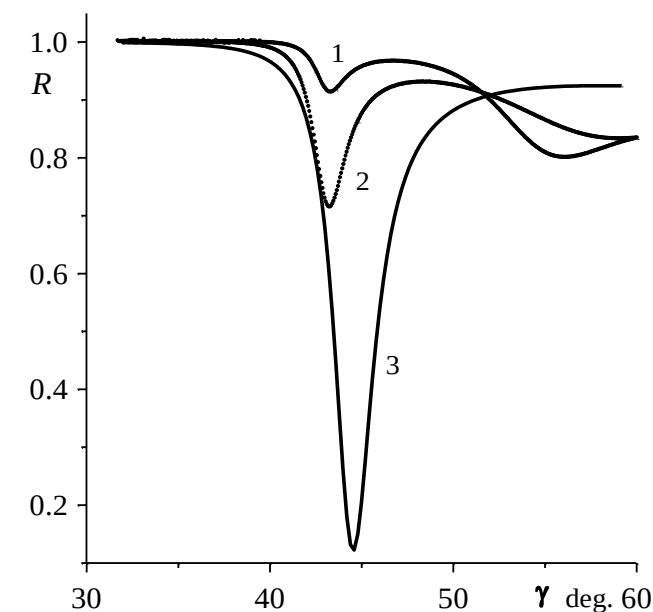


Рис. 1. Зависимости $R(\gamma)$ для пленки Au на подложке, измеренные при различной величине воздушного зазора между призмой и пленкой (кривые 1, 2), 3-расчетная кривая для плазмонного резонанса в пленке золота при $n = 0,14$ и $\chi = 3,41$ ($n = n + i\chi$), $\lambda = 0,633$ мкм

площадь фигуры, образуемой сигналом от индикации электропроводящего отложения.

Далее представлены факторы, влияющие на энергию сигнала. При увеличении толщины коррозионного слоя, протяжённости отложения вдоль и перпендикулярно оси теплообменной трубки наблюдается увеличение энергии сигнала. Так же влияющим фактором является химический состав отложения.

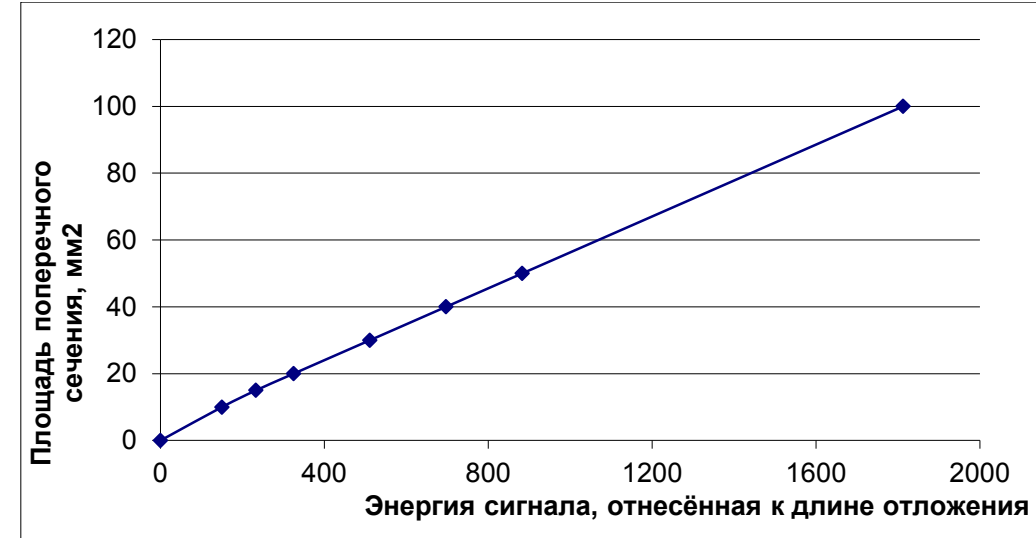


Рис. 1. Градуировочная для величины площади поперечного сечения отложения

На рис. 1. приведен пример зависимости, которую можно использовать для определения толщины слоя электропроводящих отложений. Длина отложения берётся по уровню амплитуды 0,5 от максимального уровня. Энергия сигнала определяется автоматически в программном комплексе PIRATE, разработанном на кафедре электротехники и интроскопии в Московском энергетическом институте. Следует отметить, что по представленной зависимости можно найти усреднённое значение толщины слоя отложений, поэтому для качественной оценки требуется использовать суммарный объем отложений на поверхности теплообменной трубки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Min-Kyoung Kim, Chang-Jae Yim, Eui-Lae Kim, Chang-Joon Lee and Joong-Ahm Park «Eddy current signal analysis from non-homogeneous sludge pile», Auckland, 2006.

E-mail: neron-neronov@mail.ru
LuninVP@mpei.ru
barabanov.pa@gmail.com

приведены на рис. 1.

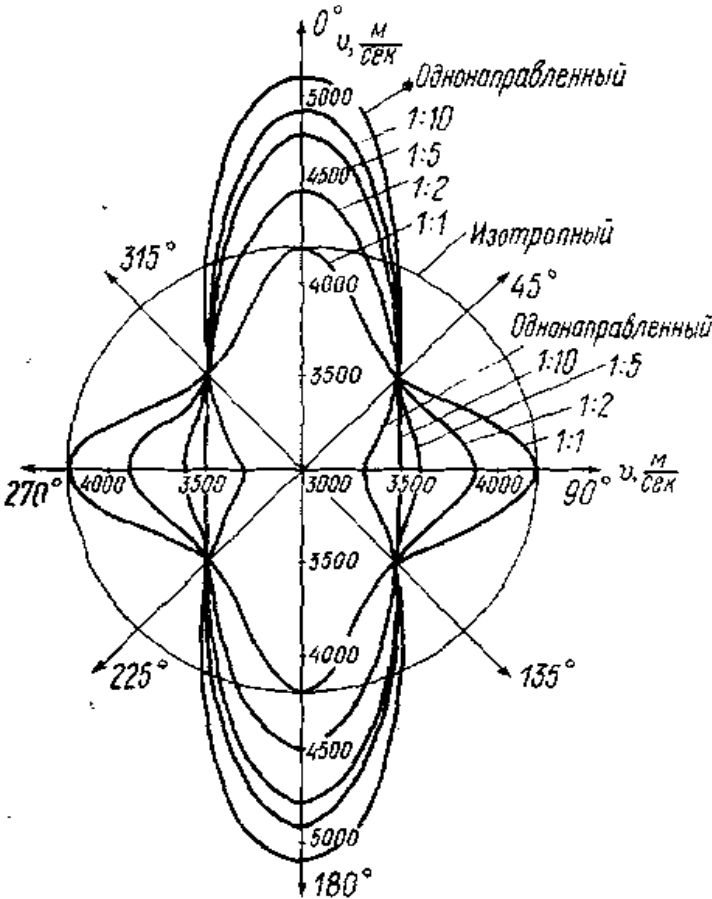


Рис. 1. Анизотропия скорости продольных волн для стеклопластиков с различной продольно-поперечной структурой в полярных координатах

Видно, что в зависимости от степени ориентации стеклопластика полярные диаграммы скорости претерпевают существенные изменения. Однако в результате экспериментальных исследований было установлено, что скорость продольных волн под углом 45° к направлению волокон имеет общее значение для всех стеклопластиков и не зависит от соотношения волокон в продольном и поперечном направлениях. Аналогичные результаты были получены и в отношении статического и динамического модулей упругости (рис. 2).

Для определения степени ориентации хаотического стеклонаполнителя были также проведены ультразвуковые испытания плит неориентированного стеклопластика ДСВ-2-Р-2М на основе фенолформальдегидного связующего с весовым содержанием стекла 62–64 %.

А. А. СТОЛЯРОВ, В. П. ЛУНИН, П. А. БАРАБАНОВ
ФГБОУ ВПО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»
Москва, Россия

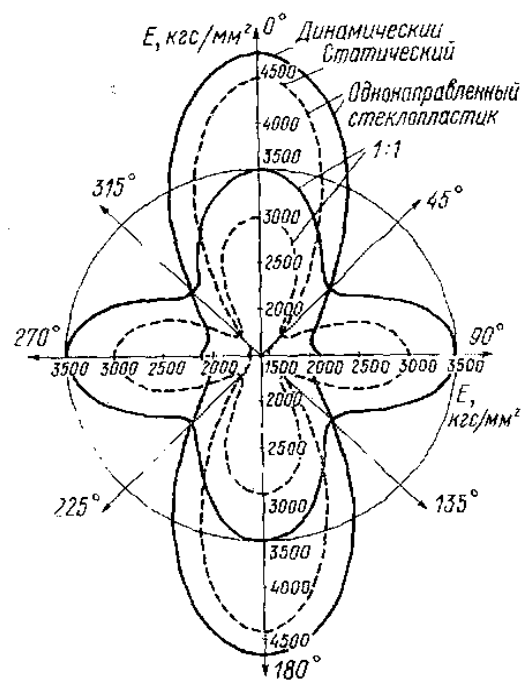


Рис. 2. Анизотропия статического и динамического модулей упругости для стеклопластиков с различной продольно-поперечной структурой в полярных координатах

Кроме стеклопластиков с хаотическим расположением стеклонеполнителя, были изготовлены плиты, в которых степень ориентации создавалась по технологии, разработанной институтом ВНИИСПВ. Некоторые результаты исследования интегральной степени ориентации в данных стеклопластиках приведены в табл. 2.

Табл. 2. Экспериментальные значения степени ориентации в неориентированных стеклопластиках

Степень заданной ориентации, %	скорость продольных волн, м/с		степень анизотропии скорости	степень ориентации определенная экспериментом
	вдоль волокон	поперек волокон		
100	4410	3160	1,39	65
0	4060	3340	1,21	25,4
25	3730	3480	1,07	13,5
Хаотическая структура	3630	3660	1,005	1,0

Приведенные результаты показывают, что между задаваемой ориентацией стеклонеполнителя и реальной, определенной экспериментально, имеется существенное различие. Это различие обусловлено, вероятно, большими трудностями обеспечения направленного расположения рубленого наполнителя в стеклопластиках.

Таким образом, импульсный ультразвуковой метод является эффективным средством для количественной оценки степени анизотропии стеклопластика непосредственно в изделиях.

Атомная энергетика является одним из главных источников электрической энергии в мире. На данный момент существует более 400 ядерных реакторов. Общая доля электрической энергии, вырабатываемой с помощью атомных станций, составляет порядка 20 % от общего производства электроэнергии. В России эксплуатируются десять атомных электростанций: Кольская АЭС, Ленинградская АЭС, Калининская АЭС, Смоленская АЭС, Курская АЭС, Нововоронежская АЭС, Ростовская АЭС, Балаковская АЭС, Белоярская АЭС, Билибинская АЭС. В сумме используются 33 энергоблока мощностью более 25000 МВт. Основными элементами системы отвода тепла являются парогенератор, теплообменная поверхность, насосы и компенсаторы давления. Теплообменная поверхность представляет U-образный трубный пучок, расположенный в горизонтальной плоскости и состоящий из труб диаметром 16 мм и толщиной стенки 1,5 мм, выполненные из нержавеющей стали 08X18H10T с суммарной поверхностью теплообмена 6250 м². Общее количество теплообменных трубок в парогенераторе превышает 11000 штук. Основными причинами выхода из строя теплообменной поверхности является образование трещин стенок теплообменных труб, а также коррозия, приводящая к росту отложений на поверхности трубного пучка. Толщина слоя отложений является одним из параметров, которые необходимо учитывать при принятии решения о глушении теплообменной трубки, проведении химической очистки парогенератора [1].

Определить толщину слоя электропроводящих отложений можно зная его объём и протяжённость вдоль оси теплообменной трубки. Следует отметить, что окружная длина отложения по поверхности трубки выбирается равной половине длины окружности трубки – 25 мм, т. к. логично предположить, что отложение не должно образовываться на нижней поверхности теплообменной трубки. Таким образом, зная площадь поперечного сечения можно вычислить толщину слоя отложений.

Для построения градуировочной характеристики по определению площади поперечного сечения отложений был выбран параметр, характеризующий энергию соответствующего вихретокового сигнала штатного преобразователя при сканировании им области отложения. Лабораторные эксперименты, проведенные с искусственными отложениями, подтверждают версию о том, что с увеличением толщины слоя отложения растёт и

личение контролируемого параметра до максимума, а затем его уменьшение до уровня обычного фона.

Согласно физических теорий можем ориентироваться на закон Ван-дер-Ваальса, который имеет максимальное значение мощности в пределах $1 \div 3$ диаметров атома. В этом случае в сенсоре контрольно-измерительной системы срабатывает субъективно определенный уровень регистрации поверхности, который фактически определяет размер величины h . Предложенный тезис является основой представления о реальной поверхности минимальной толщины, когда ее толщина h опирается на диаметр атома, из которого образована поверхность.

Рассмотрены диапазоны вариаций объема, которые могут ограничить поверхность, что является принципиальными положениями при измерениях точных технологических объектов, в частности при металлообработке. Если внешние большие объемы не вызывают больших проблем, то минимальные величины объемов вызывают ряд вопросов. Для этого обратим внимание на особенность замкнутой поверхности (оболочки) мешать в доступе к веществу, которую она покрывает. Анализируя эти положения, можно сделать вывод, что для идеализированного случая контроля параметров формообразования технологического объекта, это представляет собой несколько одинаковых атомов, расположенных в определенном порядке. Вместе атомарная структура рассматриваемых объектов будет напоминать форму криволинейного тетраэдра, вписанного между сферами, разница между радиусами которых составляет диаметр атома вещества абстрактного технологического объекта. Особым требованием, касающимся этого случая, является то, что все пять атомов – это атомы одного вещества, в данном случае, например, изготавливаемой детали. Только в этом случае подобная модель поверхности может служить как измерительный калибр при контроле геометрических параметров объекта при его изготовлении. Естественно, что кристаллическая структура является более стабильной и, как следствие, более надежной, учитывая метрологические требования к изготовлению сверхточных деталей.

Таким образом, приведенные в докладе графо-аналитические модели поверхности абстрактных технологических объектов позволят создать новые перспективные измерительные средства, которые значительно повысят точность контрольно-измерительных операций при изготовлении деталей точных приборов.

E-mail: klotchko@psf.ntu-kpi.kiev.ua

УДК 620.179.14

ПРИМЕНЕНИЕ ФЕРРОЗОНДО-ВИХРЕТОКОВОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

В. И. ПУДОВ, Ю. Я. РЕУТОВ

ФГБУН ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ

«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ УрО РАН»

Екатеринбург, Россия

В данной работе представлена новая конструкция преобразователя магнитного поля, которая может быть использована для диагностики и неразрушающего контроля качества материалов, в частности, для локализации и измерения ферромагнитной неоднородности в виде инородной примеси или структурных изменений, связанных с образованием ферромагнитной альфа-фазы в аустенитных сталях, или контроля дельта-фазы в сталях аустенитно-ферритового класса, а также при оперативной хирургии, в частности, для локализации ферромагнитной неоднородности в виде инородных тел – частиц, стружек, предметов при хирургическом удалении их из тканей и органов человека.

Рассмотрим возможность применения комбинированного феррозондо-вихретокового преобразователя в области медицины, например, в случаях общей и глазной хирургии.

Тяжелые травмы тканей и органов человека, связанные с внедрением ферромагнитных неоднородностей, требуют оперативного хирургического вмешательства. В этой связи, основное значение приобретает точность определения их местоположения. Основные методы диагностики – рентгеновский, ультразвуковой – часто оказываются малоинформативными в решении данной проблемы из-за гематом, труднодоступного размещения неоднородности, малого геометрического размера.

Сложность локализации ферромагнитной неоднородности вблизи важных органов, сосудов, нервов человека, требует применения специальной диагностической аппаратуры.

Одно из наиболее перспективно развивающихся видов специальной диагностики является феррозондовая и вихретоковая [1–5], позволяющие проводить операции, где процент извлекаемости ферромагнитной неоднородности во много раз выше, чем при традиционных методах.

Однако существующие конструкции известных феррозондовых и вихретоковых преобразователей не позволяют повысить эффективность использования феррозондовой и вихретоковой диагностики для ряда операций, например, при детских операциях, связанных с локализацией мелких ферромагнитных неоднородностей или при их локализации в глазной полости, в орбите глаза, то есть на малом операционном поле и т. д. Такого рода операции требуют создания особых конструкций устройств – малых

по размеру, но, в тоже время, имеющих высокую чувствительность рабочих элементов.

Для решения данной проблемы предложен комбинированный вид устройства в основе которого лежит феррозондовый принцип действия.

Комбинированный преобразователь содержит вихретоковую намагничивающую катушку и две пары чувствительных феррозондовых магнитомодуляционных элементов, размещенных параллельно друг другу по обе стороны от намагничивающей катушки, ортогонально продольной оси преобразователя. Чувствительные элементы могут иметь разные рабочие размеры, например, 2,5х0,6 или 2х0,6 мм, и их обмотки соединены по градиентометрической схеме.

При прохождении по обмоткам вихретоковой намагничивающей катушки преобразователя переменного тока заданной частоты (от генератора блока питания прибора) создается переменное электромагнитное поле, которое, воздействуя на ферромагнитный материал неоднородности, вызывает в нем вихревые токи. Они формируют вторичное электромагнитное поле, магнитная составляющая которого уже в зависимости от геометрической формы неоднородности определенным образом намагничивает её материал. В результате чего, вокруг неоднородности образуется достаточно сильное магнитное поле рассеяния по сравнению с полем при остаточной намагниченности материала. В феррозондовом магнитомодуляционном преобразователе при прохождении по обмоткам возбуждения его первой и второй пары чувствительных элементов, переменного тока с частой 50 Гц (от генераторов возбуждения) создается переменное магнитное поле, которое периодически доводит пермаллоевые сердечники этих чувствительных элементов до насыщения. В отсутствие ферромагнитной неоднородности, малые величины ЭДС, наводимые в измерительных обмотках чувствительных элементов феррозондового преобразователя от воздействия магнитного поля вихретоковой намагничивающей катушки, взаимно компенсируются, поскольку элементы работают по схеме градиентометра, и выходные сигналы, фиксируемые индикаторами прибора, будут отсутствовать. При этом на первую и вторую пару чувствительных элементов, установленных ортогонально друг к другу (для $\pm 180^\circ$ контроля) и к силовым линиям магнитного поля намагничивающей катушки, действуют только малые его величины, которые компенсируются, не снижая чувствительности элементов феррозондового преобразователя даже к небольшой по размерам ферромагнитной неоднородности. При поднесении рабочего конца комбинированного преобразователя к зоне расположения максимально намагниченной неоднородности, ее магнитное поле рассеяния будет воздействовать на его крайние чувствительные элементы, в результате этого в их измерительных обмотках появится ЭДС, отличающаяся от чувствительных элементов, на которые не воздействует неоднородность. Разницы величин ЭДС, передаваемые в виде выходных сигналов на стрелоч-

УДК 621.3
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ АБСТРАКТНОГО
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА ПРИ ТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

В. И. СКИЦЮК, Т. Р. КЛОЧКО
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ УКРАИНЫ
«КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»
Киев, Украина

Достаточное количество технологических операций по составлению приборов требует вычисления размерных цепей, точность вычисления которых фактически определяет конечное качество продукта производства. Основу таких цепей составляет геометрический размер детали, выполняемой с определенной конечной точностью. В сверхточном приборостроении это является очень серьезной проблемой, поскольку конечным фактором, влияющим на точность определения геометрических размеров детали, являются параметры формообразования ее поверхности. Качество поверхности определяет совокупность всех свойств поверхностного слоя материала, что особенно важно при изготовлении деталей с точным формообразованием, поскольку в условиях их дальнейшей эксплуатации, в первую очередь, внешним воздействиям подвергаются поверхности взаимодействия. Обеспечение точности технологических процессов изготовления деталей механической обработкой обусловлено рядом проблем метрологии, одна из которых состоит в определении калибра при измерениях параметров формообразования поверхности детали.

Определение размеров, формы, калибра повышают точность работы сенсора измерительной системы, поскольку поверхность любого объекта является информационным отражением его сущности в пределах зоны присутствия. Сейчас проблема состоит в том, что параметры формообразования, например, шероховатость поверхности, являются функциями нестабильной массы в пространстве, окружающем тот или иной технологический объект. Так, параметры субмикроскопического рельефа поверхности технологического объекта зависят от внутренних несовершенств металла, который деформируется в процессе обработки, и приложенных к нему напряжений.

В работе предложены модели наиболее распространенных типов поверхности. Это, во-первых, незамкнутая сама на себя (свободная в пространстве) поверхность. Во-вторых, поверхность, которая ограничивает собой определенный объем абстрактного вещества без учета своего объема.

Типичный используемый сенсор, который имеет способность проникновения через слой поверхности, будет регистрировать постепенное уве-

В табл. 1 и 2 приведены результаты решения обратных оптических задач, по которым рассчитаны соответствующие кривые на рис. 2 и 3. При этом учитывалась дисперсия оптических характеристик пленок и подложки, а переходные области имели постоянные параметры.

Табл. 1. Результаты решения обратных оптических задач

Спектрофотометрия		
i	$d_i, \mu\text{m}$	$n_i(0,0.6328)$
1	0,011	$1,63-0,2i$
2	0,411	$4,028-0,02i$
3	$8 \cdot 10^{-3}$	$2,65-0,26i$
4	0,1	1,451
5	0,012	$2,7-0,25 i$
6	-	$3,841-0,041 i$

Табл. 2. Результаты решения обратных оптических задач

Многоугловая эллипсометрия					
1	-0,190	10^{-4}	7	$1,68 \cdot 10^{-6}$	10^{-9}
2	-1,027	10^{-6}	8	3,89	10^{-4}
3	-0,974	10^{-6}	9	0,031	10^{-4}
4	3,974	10^{-4}	10	0,421	10^{-3}
5	0,0289	10^{-5}	11	0,104	10^{-3}
6	1,457	10^{-5}	-	-	-

Таким образом, результаты исследований свидетельствуют о том, что серийно изготовленные структуры pSi – SiO₂ – cSi содержат неоднородные переходные области, параметры которых зависят от условий получения пленок pSi и SiO₂. Спектральные методы более чувствительны к наличию переходных областей и для их учета необходимо определять дисперсионные функции материалов всех слоев в структуре. При этом однопараметрическая модель переходного слоя с поляризуемостью α_{zj} позволяет исключить его влияние на результаты определения толщины и оптических параметров структуры «полупроводник – диэлектрик – полупроводник».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Беляева, А. И.** Границы раздела слоев и шероховатость в многослойной кремниевой структуре / А. И. Беляева, А. А. Галуза, С. Н. Коломиец // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38. Вып. 9. – С. 1050–1055.
2. Учет влияния естественного поверхностного слоя при исследовании кремниевых пластин методом спектральной эллипсометрии / Н. И. Стаськов [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. – 2012. – № 1(10). – С. 1–5.

ный, звуковой или цифровые индикаторы прибора информируют об обнаружении неоднородности и позволяют установить её форму и ориентацию относительно рабочего конца устройства. В физическом смысле данные величины ЭДС являются мерой продольного градиента тангенциальной компоненты магнитного поля рассеяния ферромагнитной неоднородности направленных относительно продольной оси комбинированного преобразователя.

При необходимости, комбинированный преобразователь может также работать в режиме возбуждения обмотки вихретоковой намагничивающей катушки с постоянным или импульсным током. Причем в этом режиме можно дополнительно перепроверять результаты локализации ферромагнитной неоднородности, путем временного отключения намагничивающей катушки и исследования неоднородности уже при приобретенной ею в этот момент намагненности, величина которой значительно выше, чем при сформировавшейся остаточной намагненности неоднородности, но меньше, чем при её максимальном намагничивании.

Чувствительность комбинированного феррозондо-вихретокового преобразователя определялась в положениях, характерных для взаимной ориентации ферромагнитной неоднородности относительно его рабочей концевой части (см. рис. 1).

На рисунке показан вид и изменение выходного сигнала комбинированного преобразователя в зависимости от формы инородных ферромагнитных неоднородностей, которые имеют основные формы представленные в виде: 1 – шара; 2 – диска; 3 – пластины; 4 – стержня.

Сравнение полученных результатов показывает, что чувствительность комбинированного преобразователя на 25-30 % выше чувствительности преобразователей предыдущих моделей вихретокового прибора ЛИТ-2 и феррозондового ПФ-02 [2, 3].

Комбинированный феррозондо-вихретоковый преобразователь обнаруживает, например, мелкие ферромагнитные неоднородности, частицы размером 1,8×1,0 мм на расстоянии 30–35 мм; обломок швейной иглы размером 10×0,8 мм на расстоянии 85–97 мм; обломок инъекционной иглы размером 10×0,7 мм на расстоянии 61–79 мм.

Таким образом, разработанный преобразователь позволяет на качественно новом уровне повысить эффективность диагностики ферромагнитной неоднородности при оперативной хирургии, ферритометрии, неразрушающем контроле материалов. Благодаря его комбинированной конструкции, значительно увеличивается достоверность и точность локализации ферромагнитной неоднородности, в т. ч. небольшой по размеру или слабомагнитной за счет возможности локального намагничивания неоднородности, и, как следствие, увеличения величины её магнитного поля рассеяния до уровня восприятия чувствительными элементами преобразова-

теля, а также осуществления ее двойного контроля при $\pm 180^\circ$ сфере обзора среды. Приобретение комбинированным феррозондо-вихретоковым преобразователем новых функциональных возможностей позволило существенно расширить области для его практического использования и диапазон номенклатуры контролируемой неоднородности.

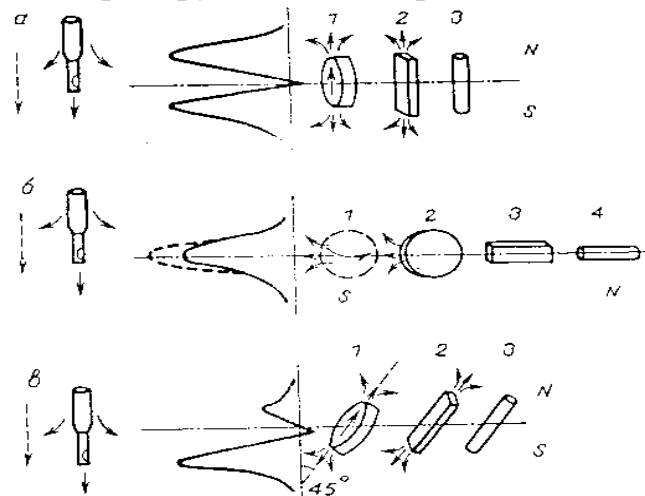


Рис. 1. Магнитомодуляционные элементы преобразователя воспринимают тангенциальную компоненту магнитного поля рассеяния ферромагнитной неоднородности

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Краснов, М. Л.** Руководство по глазной хирургии / М. Л. Краснов, В. С. Беляев. – М., 1988. – 320с.
2. **Пудов, В. И.** Локализация и удаление инородных металлических тел с помощью вихретокового локатора ЛИТ-2 / В. И. Пудов, Ю. Я. Реутов, С. А. Коротких // Медицинская техника. – 1996. – № 4. – С. 23–28.
3. Локализация и удаление инородных ферромагнитных тел с помощью феррозондового полюсоискателя ПФ-02 / В.И. Пудов [и др.] // Медицинская техника. – 1996. – № 6. – С. 28–33.
4. **Пат. 2123816. РФ, МПК⁶ А61 В 17/50, А 61 В 5/06.** Вихретоковый металлоискатель / Заявитель Ин-т физики металлов УрО РАН; патентообладатели / В. И. Пудов, Ю. Я. Реутов, С. А. Коротких. № 96118542/14; заявл. 18.09.96; опубл. 27.12.98, Бюл. № 36 (II ч.).
5. **Пат. 2127076 РФ, МПК⁶ А 61 В 5/06.** Способ Пудова В.И. для феррозондовой диагностики инородных ферромагнитных тел / В. И. Пудов, В. А. Куликов, С. А. Коротких; Заявитель Ин-т физики металлов УрО РАН; патентообладатели / В. И. Пудов, С.А. Коротких. – № 96117173/14; заявл 23.08.96; опубл. 10.03.99, Бюл. № 7 (II ч.).

E-mail: pudov@imp.uran.ru

Спектры $R_s(\lambda)$, $R_p(\lambda)$ и $R_p(\lambda)/R_s(\lambda)$ образцов при углах падения от 8° до 60° измеряли на спектрофотометре «Photon RT» (ООО «ЭссентОптикс») в области от 0,4 до 0,8 μm (рис. 2, кривые 1, $\varphi_{01} = 60^\circ$). Шаг изменения λ составлял 0,5 нм по углу $\varphi_{01} = 10^\circ$. Точность измерения коэффициентов R – не ниже 0,1 %.

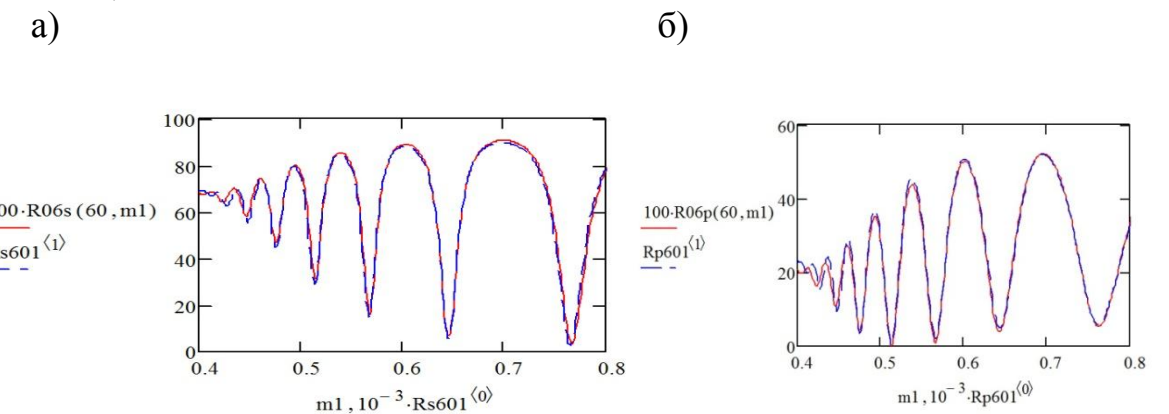


Рис. 2. Измеренные и рассчитанные спектры структуры pSi – SiO₂ – cSi для s- и p-поляризации света

По положению максимумов и минимумов методом огибающих интерференционных спектров была определена толщина слоя pSi

$$d_{pSi} = \frac{(2p\pi + \alpha_{13}(\lambda_v) - \alpha_{13}(\lambda_{v+p}) - \alpha_{01}(\lambda_v) + \alpha_{01}(\lambda_{v+p}))\lambda_v\lambda_{v+p}}{4\pi(\lambda_{v+p}n_1(\lambda_v) - \lambda_v n_1(\lambda_{v+p}))},$$

которая оказалась равной 0,425 μm .

При этом спектры $R_e(\lambda)$ структуры pSi – SiO₂ – cSi измеряли в воздухе на спектрофотометре «MPV – SP» (Leica, Германия) в диапазоне длин волн от 0,4 до 0,8 μm .

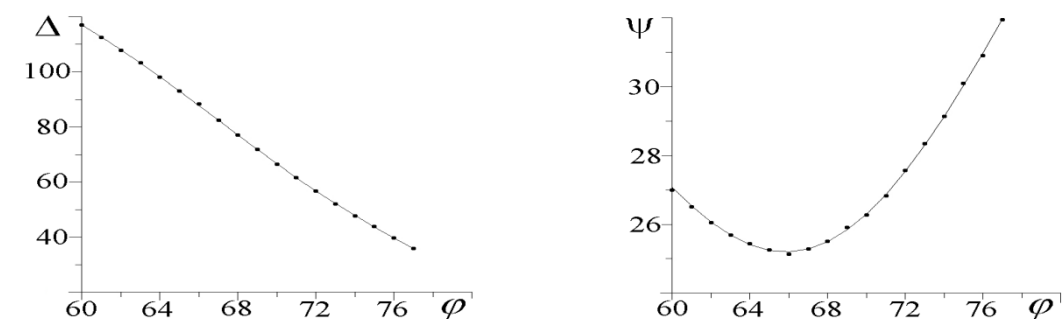


Рис. 3. Измеренные и рассчитанные спектры $\Delta(\varphi)$, $\psi(\varphi)$ структуры

Эллипсометрические углы Δ_e и Ψ_e для образцов измерялись на стандартном эллипсометре ЛЭФ- 2 ($\lambda = 632,8$ нм) при углах падения от 60° до 77° с достаточным шагом для каждой структуры (рис. 3, дискретные точки).

С. О. ПАРАШКОВ, Н. И. СТАСЬКОВ, *А. В. ХОМЧЕНКО,
 *Л. И. СОТСКАЯ, А. В. ШИЛОВ, **Н. А. КРЕКОТЕНЬ
 УО «МОГИЛЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
 им. А. А. Кулешова»
 *ГУ ВПО «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
 **НТЦ «БЕЛМИКРОСИСТЕМЫ» ОАО «ИНТЕГРАЛ»
 Могилев, Минск, Беларусь

Широкое применение в электронной промышленности находит кремниевая двухслойная ПДП структура «поликристаллический кремний (pSi) – диоксид кремния (SiO₂) – монокристаллический кремния (cSi)». На рабочие параметры приборов, созданных на основе таких структур, существенное влияние оказывают переходные области между слоями и подложкой (рис. 1, а) [1].

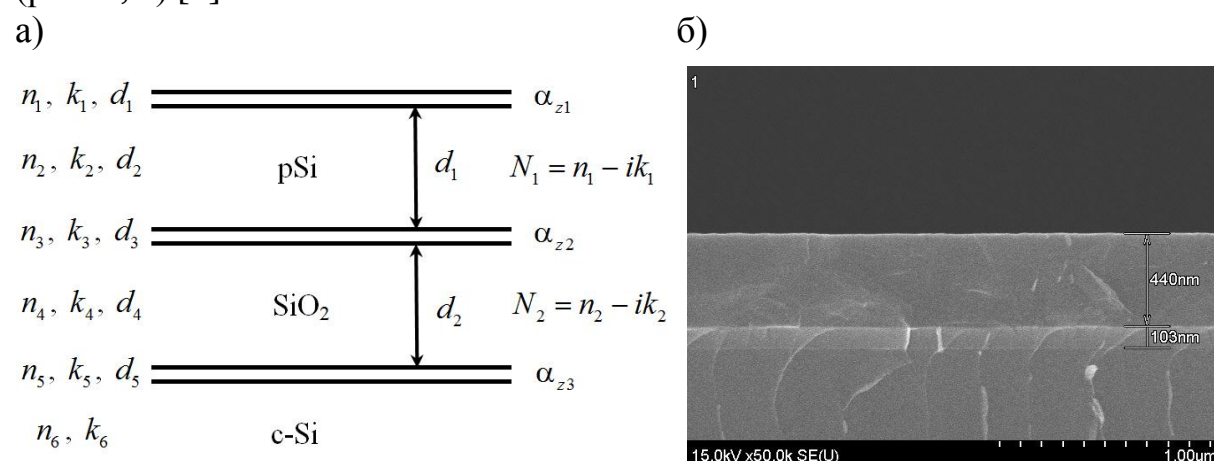


Рис. 1. Оптическая модель отражающей системы (а) и фотография скола структуры pSi – SiO₂ – cSi (б) на растровом электронном микроскопе РЭМ S-4800 фирмы Hitachi

В данной работе обсуждаются решения обратных оптических задач при исследовании серийно изготовленной pSi – SiO₂ – cSi структуры методами спектрофотометрии и многоугловой эллипсометрии, допускающих наличие переходных слоев. Рассматривались две модели слоев - плоский слой с параметрами d, n, k и слой диполей с поляризуемостью α_{zj} [2]. Вторая модель использовалась для исключения влияния переходных слоев без детализации их внутренней структуры. Это позволяет сократить количество рассчитываемых параметров при численном решении обратных оптических задач. В качестве подложки использовался кремний КДБ 12 с кристаллографической ориентацией (111). Из рис. 1, б можно оценить толщины слоев pSi (0,44 μm) и SiO₂ (0,10 μm).

И. С. САВИН, И. В. ТЕРЕХИН
 ФГБОУ ВПО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»
 Москва, Россия

В настоящее время сталь разливают преимущественно непрерывным способом в кристаллизаторах. Основная часть кристаллизатора – медная гильза – представляет собой трубу квадратного или круглого сечения, открытую с двух сторон и охлаждаемую снаружи водой. Жидкая сталь поступает из промежуточного ковша в гильзу, где образуется твердая корочка слитка. Затем стальная заготовка вытягивается из кристаллизатора [1]. В процессе разлива необходимо точно поддерживать уровень металла в гильзе как с точки зрения безаварийной работы, так и для обеспечения высокого качества металла. На данный момент для измерения уровня металла применяют радиоизотопные и вихретоковые датчики. Последние применяются в кристаллизаторах с большим проходным сечением (блочные и слябовые) и устанавливаются на штативе над зеркалом расплава или на краю кристаллизатора [2].

Для сортовых кристаллизаторов с малым проходным сечением нет возможности установить вихретоковый датчик над зеркалом расплава, поэтому в сортовых кристаллизаторах до сих пор используются радиоизотопные датчики. Радиоизотопные датчики небезопасны для персонала, к ним предъявляются жесткие требования в плане эксплуатации, транспортировки и утилизации, что сопровождается большими финансовыми расходами. Качество стали, произведенной при контроле уровня по показанию вихретокового датчика, выше за счет более высокой точности и нечувствительности к шлакообразующей смеси, периодически добавляемой в кристаллизатор в процессе разлива. Поэтому электромагнитный датчик уровня был бы очень востребован в сортовых кристаллизаторах.

Конструкция сортовых кристаллизаторов такова, что датчик можно установить только внутри кристаллизатора на боковой поверхности гильзы (рис. 1). Принципиально возможны две конструкции датчика: накладной и проходной. Накладной датчик уровня состоит из одной вытянутой возбуждающей катушки и набора соосных с ней измерительных катушек. Проходной состоит из набора включенных последовательно параметрических проходных вихретоковых датчиков, охватывающих гильзу. При таком положении датчика измерять уровень приходится через медную стенку толщиной 10–15 мм, которая является сильным электромагнитным экраном. Температура и электрическая проводимость, медной стенки значительно

изменяются при перемещении уровня. Из-за экранирования расплава медной стенкой, сигнал от стали мал. Температура гильзы связана с уровнем металла, поэтому для оценки свойств датчика необходимо рассматривать совместную электромагнитно-тепловую модель. Большая часть сигнала датчика обусловлена вихревыми токами на поверхности медной гильзы, температура которой меняется с отставанием около 2–3 с относительно изменения уровня расплава, в то время как максимально допустимое запаздывание сигнала датчика составляет 0,5 с.

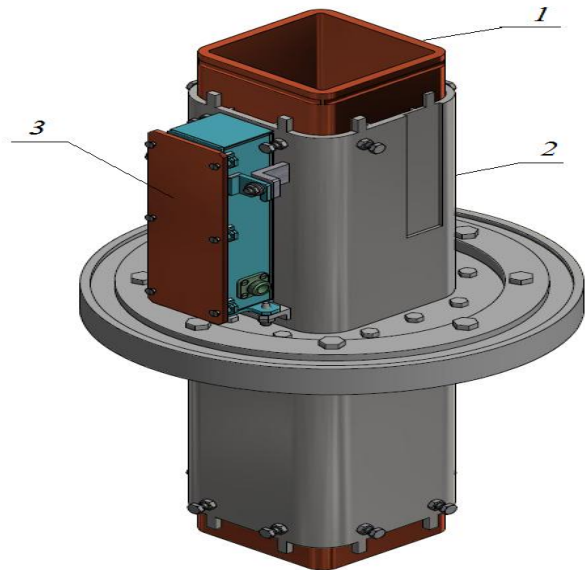


Рис. 1. Положение датчика уровня на гильзе сортового кристаллизатора: 1 – гильза, 2 – обечайка из нержавеющей стали, 3 – датчик уровня

Исследование обоих датчиков проводилось с помощью конечно-элементного моделирования. На основании результатов моделирования были определены величины составляющих сигнала датчиков, частотные годографы этих составляющих с помощью которых выбрана оптимальная частота возбуждения. Сигналы определялись как в статическом режиме разливки (при очень медленном изменении уровня), так и в динамическом, когда тепловые переходные процессы сильно влияют на сигнал датчика уровня. На основании полученных результатов для каждого типа датчиков рекомендованы алгоритмы выделения уровня металла, обеспечивающие запаздывание сигнала не более 0,3 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация МНЛЗ в СССР и за рубежом / Черная металлургия. Серия Автоматизация металлургического производства. – М., 1983.
2. **Терехин, И. В.** Разработка вихретоковых средств контроля уровня жидкого металла в гильзовом кристаллизаторе при непрерывной разливке стали: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 2008.

E-mail: Igorkoff@inbox.ru
terekhin.iv@mail.ru

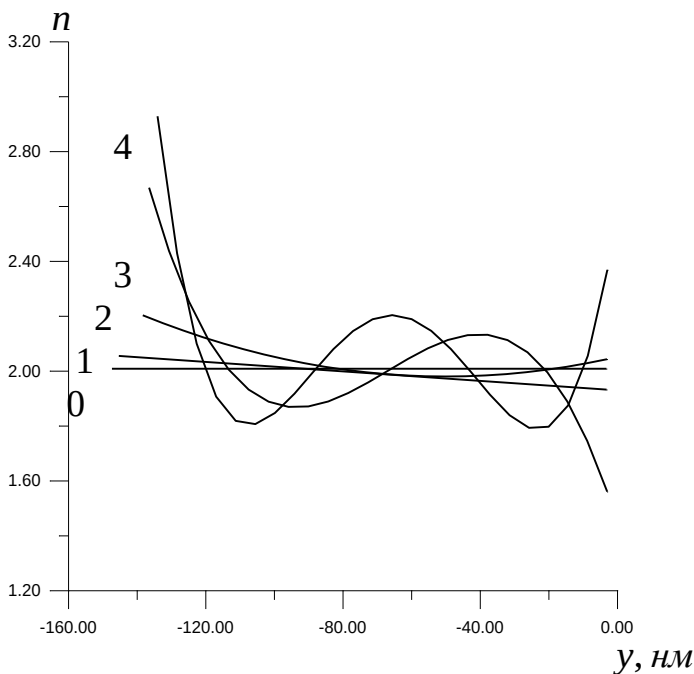


Рис. 2. Восстановление профиля показателя преломления пленки $n(y)$ при различных порядках интерполяционного полинома $Y_j(y)$. Номера кривых совпадают с порядком полинома j

Согласно рис. 2, результат восстановления $n(y)$ получился неоднозначным. В такой ситуации оптимальное значение j может быть выбрано в соответствии с критерием минимума целевой функции. Этот критерий иллюстрируется табл. 1.

Табл. 1. Зависимость целевой функции и восстановленной толщины пленки от порядка интерполяционного полинома m

m	F_{sp}	$-p_1, нм$
0	$6,20 \cdot 10^{-2}$	150,3
1	$1,21 \cdot 10^{-3}$	148,4
2	$5,31 \cdot 10^{-4}$	141,2
3	$5,79 \cdot 10^{-4}$	139,4
4	$1,92 \cdot 10^{-3}$	136,8

Согласно табл. 1 оптимальный порядок $m = 2$. Эффективность рассмотренного критерия подтверждена в вычислительных экспериментах по восстановлению функций $n(\lambda, y)$ для различных пленок.

на экспериментальном промежутке длин волн и в пределах толщины пленки $-p(1) \leq y \leq 0$. Таким образом $l = 2(n+1)(m+1) + 1$.

Ниже представлены результаты обработки экспериментальных спектров $R_{s,p}^{(e)}(\lambda)$ для пленки ZrO_2 толщиной около 150 нм, напыленной на подложку из стекла К8. Измерения выполнены на автоматизированном спектрофотометре Photon RT при $N=4$ ($\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_2 = 40^\circ$, $\theta_3 = 50^\circ$, $\theta_4 = 60^\circ$) в диапазоне длин волн $400\text{ нм} \leq \lambda \leq 880\text{ нм}$ с шагом $\Delta\lambda = 2\text{ нм}$. Результаты расчетов соответствуют $n=12$ и различным значениям m . Они получены путем минимизации целевой функции $F_{sp}(p_1, \dots, p_l)$ градиентным методом в приближении отсутствия поглощения в пленке ($k(\lambda, y) = k_{ij} = 0$, $l = (n+1)(m+1) + 1$). Зависимости $n(\lambda)$ и $k(\lambda)$ для подложки брались из известных дисперсионных таблиц.

На рис.1 представлены экспериментальные и расчетные спектры энергетических коэффициентов отражения.

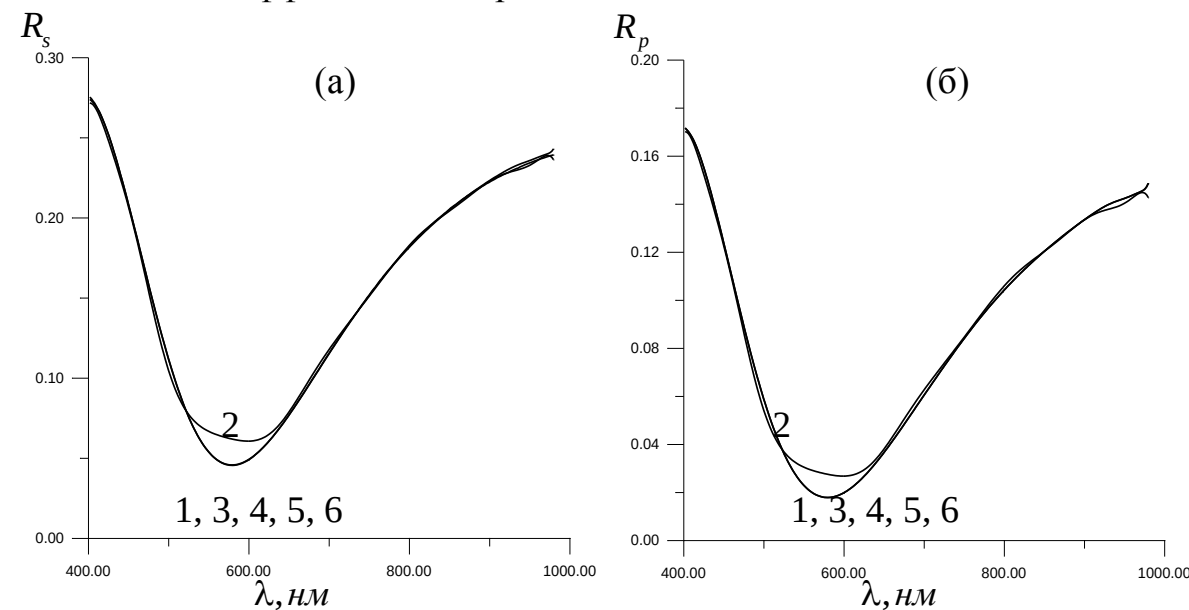


Рис. 1. Спектры отражательной способности пленки ZrO_2 для волн s – (а) и p – (б) поляризации при $\theta_1 = 30^\circ$. Кривые 1 - $R_{s,p}^{(e)}(\lambda)$, 2 - $R_{0s,p}(\lambda)$, 3, 4, 5, 6 - $R_{1,2,3,4s,p}(\lambda)$

Как видно из рис. 1, зависимости $R_{s,p}^{(e)}(\lambda)$ и $R_{is,p}(\lambda)$ при $i=1,2,3,4$ практически совпадают. Однако зависимости 2, рассчитанные в рамках модели однородной пленки, существенно отклоняются от эксперимента, что указывает на неоднородность пленки.

На рис. 2 приведены результаты восстановления профиля показателя преломления пленки $n(y)$ по длине волны $\lambda = 400\text{ нм}$.

УДК 620.179.14

ОСОБЕННОСТИ НАМАГНИЧИВАНИЯ ЧУГУНОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ ВНУТРЕННЕГО КОЭФФИЦИЕНТА РАЗМАГНИЧИВАНИЯ

С. Г. САНДОМИРСКИЙ

ГНУ «ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ

НАН Беларуси»

Минск, Беларусь

Магнитные свойства чугуна зависят от структуры металла. Это позволяет использовать результаты их измерения для контроля структуры и прочностных свойств чугунных изделий, определяет важность исследований намагничивания чугуна. Намагничивание чугуна в замкнутой магнитной цепи отличается от намагничивания стали размагничивающим влиянием немагнитных графитовых включений, которое характеризуют внутренним коэффициентом $N_{\text{вн}}$ размагничивания. Даны количественные оценки изменений соотношений между магнитными параметрами чугунов по сравнению с соотношениями для сталей, обусловленных влиянием графитовых включений разной формы. Проведен анализ возможности сортировки чугунов с разной структурой друг от друга и от сталей по результатам магнитных измерений.

В магнитной структуроскопии используют измерения остаточной намагниченности и максимальной магнитной проницаемости материала изделий. Поэтому наибольший интерес представляет определение $N_{\text{вн}}$ чугунов на нисходящей ветви предельной петли магнитного гистерезиса в области остаточной намагниченности и на основной кривой намагничивания в области максимальной магнитной проницаемости.

Оценка внутреннего коэффициента размагничивания чугунов по результатам измерения их остаточной намагниченности проведена в [1]. Анализ намагничивания чугуна, как однородно намагничиваемого тела с размагничивающим фактором $N_{\text{вн}}$, показал, что $N_{\text{вн}}$ чугунов на нисходящей ветви предельной петли магнитного гистерезиса в области остаточной намагниченности обратно пропорционален намагниченности M_s их технического насыщения и прямо пропорционален коэрцитивной силе H_c и параметру γ . По результатам статистического анализа соотношений между остаточной намагниченностью и M_s сталей и чугунов с разной формой включений определены значения параметра γ для высокопрочного ($\gamma \approx 0,983$) и серого ($\gamma \approx 1,364$) чугунов. Установлено, что $N_{\text{вн}}$ литого серого чугуна на нисходящей ветви предельной петли гистерезиса в области остаточной намагниченности в 18 раз меньше его $N_{\text{вн}}$ на основной кривой намагничивания в сильном поле. По результатам статистической обработки зависимостей остаточной намагниченности сталей и чугунов от их M_s установлено, что остаточная намагниченность высокопрочного чугуна в 1,32 раза, а серого чугуна – в 1,49 раза меньше, чем остаточная намагни-

ченность стали с той же M_s . Этот результат можно использовать для разработки методов отсортировки чугуновых изделий с различной формой графитовых включений от сталей и друг от друга.

Та же методика использована для аналитического описания связи максимальной магнитной проницаемости μ_{mt} чугунов с их H_c , анализа отличий этой связи для сталей и чугунов, оценки значений μ_{mt} чугунов различной структуры по результатам измерения их H_c [2]. Показано, что, если максимальная магнитная проницаемость μ_m сталей может быть оценена по их H_c по формуле (размерность H_c – кА/м) [3]

$$\mu_m(H_c) \approx 1 + 35000 \cdot e^{-4H_c^{0,285}}, \quad (1)$$

то для чугунов эта зависимость имеет вид:

$$\mu_{mt}(H_c) \approx \frac{\mu_m(H_c)}{1+k}, \quad (2)$$

где k – коэффициент, зависящий от формы графитовых включений.

На рис. 1 расчеты зависимости $\mu_m(H_c)$ по (1) и зависимости $\mu_{mt}(H_c)$ по (2) при $k = 1,37$ сопоставлены с экспериментом для 203 чугунов с магнитными параметрами, изменяющимися в пределах $40 \leq \mu_{mt} \leq 2120$ и $120 \text{ А/м} \leq H_c \leq 6078 \text{ А/м}$. Это практически весь возможный для чугунов интервал изменения H_c и μ_{mt} . На рис. 1 для наглядности представлены результаты для чугунов с $H_c \leq 1,5 \text{ кА/м}$. Значение $k = 1,37$ обеспечивает наименьшее отклонение между расчетом по (2) и экспериментом. Данные свидетельствуют о физически верном описании корреляционной связи между μ_{mt} и H_c уравнением (2) при $k = 1,37$. R в линейном уравнении регрессии $\mu_{mt}(\text{расчетное}) = \mu_{mt}(\text{экспериментальное})$ составил 0,926. Средняя квадратическая ошибка σ расчета по (2) при $k = 1,37$ составила $\sigma \approx 130$.

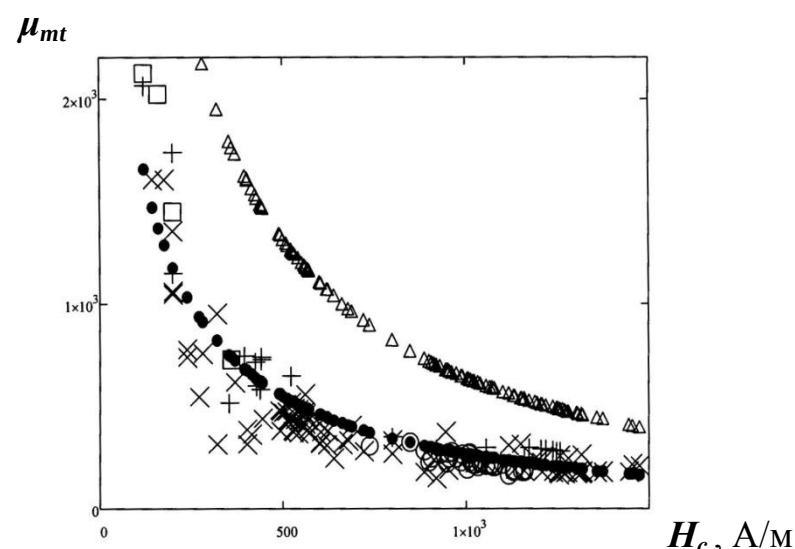


Рис. 1. Зависимость максимальной магнитной проницаемости μ_{mt} чугунов от их H_c : x, +, □ и ○ – экспериментальные результаты соответственно для серого, высокопрочного, ковкого и белого чугунов; Δ и ● – результаты расчета μ_{mt} по формулам (1) и (2) при $k = 1,37$

УДК 535.31; 621.372

К ПРОБЛЕМЕ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПЕКТРОФОТОМЕТРИИ НЕОДНОРОДНОГО СЛОЯ

С. О. ПАРАШКОВ, *К. Н. КРИВЕЦКИЙ, А. Б. СОТСКИЙ, И. С. ДЗЕН,
**Л. И. СОТСКАЯ

УО «МОГИЛЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

им. А. А. Кулешова»

*ООО «ЭССЕНТОПТИКС»

**ГУ ВПО «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Могилев, Минск, Беларусь

Актуальной проблемой, возникающей при создании тонких пленок, является неразрушающий контроль неоднородности их свойств по толщине. Один из распространенных методов оптической диагностики таких пленок – спектрофотометрия. В работах А. В. Тихонравова с соавторами разработан метод восстановления профиля показателя преломления пленок $n(y)$ путем измерения и обработки спектра их отражательной способности $R(\lambda)$ при нормальном падении света на поверхность пленки. Однако для повышения точности определения $n(y)$ представляет интерес решение обратной оптической задачи по обработке функции $R(\lambda)$ в случае наклонного падения поляризованного света на пленку, которое и рассматривается в настоящей работе.

Авторы используют метод наименьших квадратов с целевыми функциями

$$F_{s,p}(p_1, \dots, p_l) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left[(R_{s,p}^{(e)})_{ij} - R_{is,p}(\lambda_j, p_1, \dots, p_l) \right]^2;$$

$$F_{sp}(p_1, \dots, p_l) = F_s(p_1, \dots, p_l) + F_p(p_1, \dots, p_l),$$

где i – номер угла падения света θ_i ; j – номер длины волны излучения; $(R_{s,p}^{(e)})_{ij}$ – экспериментальные данные для энергетических коэффициентов отражения волн s и p поляризации. Функции $R_{is,p}(\lambda_j, p_1, \dots, p_l)$ рассчитываются в когерентном приближении с помощью известных рекуррентных соотношений. Величины p_i – подлежащие определению толщина пленки ($i=1$) и параметры, описывающие зависимости $n(\lambda, y)$, $k(\lambda, y)$ где $(k(\lambda, y)$ – показатель поглощения пленки). Данные параметры представляют собой коэффициенты разложений

$$n(\lambda, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m n_{ij} L_i(\lambda) Y_j(y), \quad k(\lambda, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m k_{ij} L_i(\lambda) Y_j(y),$$

где $L_i(\lambda)$ и $Y_j(y)$ – полиномы Лагранжа степеней n , и m , нули которых совпадают с нулями полиномов Чебышева степеней $n+1$ и $m+1$, заданных

мод TE_{01} и TM_{11} . Результаты экспериментов подтвердили работоспособность датчика толщиномера и его низкую чувствительность к диэлектрическим свойствам измеряемого покрытия.

Резонансные методы также широко используются при измерении влажности материалов. Одним из наиболее важных применений этого типа является измерение влажности бетона. Серьезной проблемой в этой задаче является довольно высокая проницаемость бетона, которая с учетом влажности может превышать 6. В данной работе исследована возможность контроля влажности при использовании в качестве чувствительного элемента датчика в виде корундового кольца. Поскольку диэлектрическая проницаемость корунда равна 9,6, в кольцо может концентрироваться достаточная для резонанса энергия волны даже при контакте с влажным бетоном. Кроме того, механические свойства корунда обеспечивают достаточную износостойкость такого датчика влагомера.

Резонаторный датчик в форме кольца (т.е. замкнутого диэлектрического волновода) помещен в металлическую обойму так, что открытой остается лишь одна его торцевая стенка. Эта стенка заподлицо с торцом металлического корпуса и формирует контактную площадку датчика. Ввод энергии в резонатор и съем сигнала производятся с помощью двух одинаковых штыревых возбuditелей длиной 1 мм. Выполнены расчеты частотного отклика резонатора в зависимости от размеров резонатора, диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь контролируемой среды, приложенной к кольцу. Размеры резонатора выбраны для обеспечения резонансов на частотах 2–4 ГГц. На этих частотах влияние влажности на прохождение волны практически столь же сильное, как и на низких частотах, но при этом значительно меньше эффект солености и воздействия примесей. Кроме того, по причине зернистой структуры бетона площадь датчика должна быть достаточно большой. Исходя из этих соображений, диаметр кольцевого резонатора выбран 60 мм.

Расчеты показали, что такой датчик может использоваться сразу в нескольких поддиапазонах частот. В частности, при изменении диэлектрической проницаемости внешней среды от 1 до 6 резонансная частота сдвигается с 2,93 до 2,75 ГГц и с 3,39 до 3,23 ГГц, при этом амплитуда сигнала в резонансе определяется тангенсом угла потерь в материале. Совокупность полученной информации позволяет оценивать влажность бетона с довольно высокой точностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Mikhnev, V.** Permittivity-independent measurement of the thickness of thin dielectric films on conducting substrates / V. Mikhnev, V. Konev // Proceedings of the 6th European Conference on Non-Destructive Testing. – Nice. – 24–29 Oct. 1994. – P. 1223–1224.

Сопоставление зависимости $\mu_m(H_c)$, рассчитанной по (1), и зависимости $\mu_{mt}(H_c)$, рассчитанной по (2) при $k = 1,37$, показало, что при одинаковой H_c μ_{mt} чугунов составляет в среднем 42 % от μ_m сталей. Такая разница в соотношениях между H_c и максимальной магнитной проницаемостью сталей и чугунов может быть использована для отсортировки сталей и чугунов друг от друга.

В [2] показано, $N_{вн}$ чугунов в их магнитном состоянии, соответствующем области максимальной магнитной проницаемости μ_{mt} на основной кривой намагничивания, может быть оценен величиной

$$N_{вн} \approx k / [(1 + k) \mu_{mt}]. \quad (3)$$

Анализ различия в значениях коэффициента k при расчете μ_{mt} по (2) для чугунов с различной формой графитовых включений не выявил статистически значимого различия в значениях $k \approx 1,71$ при отдельном анализе зависимостей $\mu_{mt}(H_c)$ для белого (с преобладанием углерода в связанном состоянии) и серого (с пластинчатой формой графитовых включений) чугунов. Но для чугунов с компактной формой графитовых включений (высокопрочного и ковкого) значения k существенно ниже и составляют соответственно 1,02 и 0,83. Этот результат также может быть использован для разработки методов отсортировки чугунных изделий с различной формой графитовых включений не только от сталей, но и друг от друга. Так, среднее значение произведения $\mu_{mt}H_c$ (кА/м) для 117 чугунов с пластинчатой формой включений составил 265 при $\sigma = 89$. Для 48 чугунов со сферической формой включений среднее значение произведения $\mu_{mt}H_c$ (кА/м) составило 351,5 при $\sigma = 115$. Для 313 разных сталей, использованных для анализа взаимосвязи μ_m и H_c в [3], среднее значение произведения μ_mH_c (кА/м) составило 526,4 при $\sigma = 132$.

В работе также выявлены отличия в связи μ_m с коэрцитивной силой H_c и остаточной намагниченностью для сталей и чугунов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сандомирский, С. Г.** Оценка внутреннего коэффициента размагничивания чугунов по результатам измерения их остаточной намагниченности / С. Г. Сандомирский // Металлы. – 2013. – № 3. – С. 88–94.
2. **Сандомирский, С. Г.** Оценка максимальной магнитной проницаемости чугунов по коэрцитивной силе / С. Г. Сандомирский // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012. – Т. 78. – № 12. – С. 39–44.
3. **Сандомирский С. Г.** Оценка максимальной магнитной проницаемости сталей по коэрцитивной силе / С. Г. Сандомирский // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2011. – Т. 77. – № 3. – С. 35–38.

E-mail: sand@iaph.bas-net.by

УДК 620.179.14
 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
 ОСТАТОЧНОГО МАГНИТНОГО ПОТОКА ИЗДЕЛИЙ МАССОВОГО
 ПРОИЗВОДСТВА

С. Г. САНДОМИРСКИЙ
 ГНУ «ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ
 НАН Беларуси»
 Минск, Беларусь

Важным разделом магнитной структуроскопии является разработка методов и средств магнитного контроля качества изделий массового производства. Их особенностью является необходимость бесконтактного намагничивания изделий в движении и бесконтактного измерения магнитного состояния изделий после намагничивания. Для контроля качества отпуски изделий из среднеуглеродистых сталей, используемых в машиностроении, необходимо дозированно размагнитить изделия после намагничивания. При этом остаточная намагниченность в изделии может оказаться небольшой и быть подверженной влиянию случайных магнитных полей и поля Земли. Измерение остаточной намагниченности в таких изделиях становится важной технической задачей.

В работе проанализированы преобразователи средств магнитного контроля изделий массового производства. Выявлены их основные недостатки: невысокие точность и достоверность измерения остаточного магнитного потока в движущемся изделии, связанные со смещениями изделий в процессе движения, влиянием внешних переменных и постоянных магнитных полей на намагниченное изделие при измерении.

Недостатки устранены в разработанном преобразователе (рис. 1).

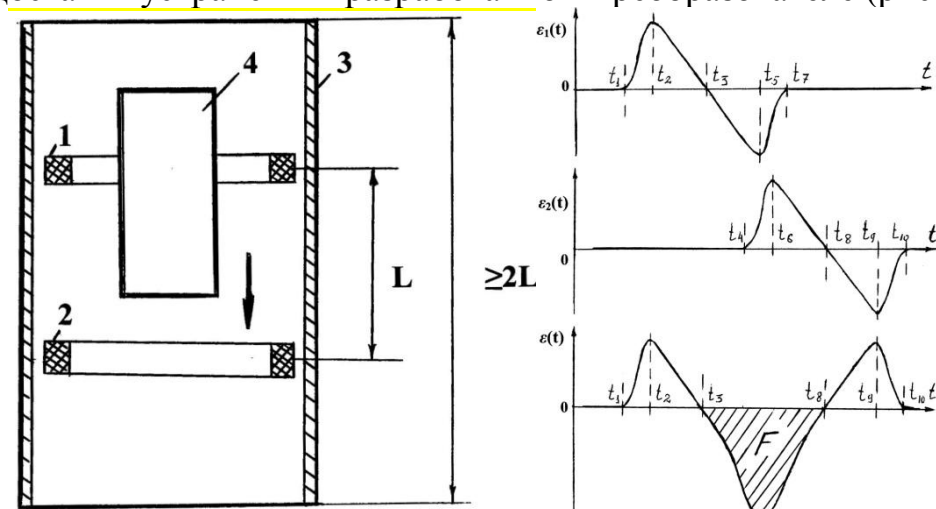


Рис. 1. Схема расположения индукционных катушек и кожуха в преобразователе, сигналы $\varepsilon_1(t)$ и $\varepsilon_2(t)$ на выходах индукционных катушек преобразователя и сигнал $\varepsilon(t)$ преобразователя при движении сквозь него намагниченного изделия

таты расчетов показали, что, действительно, электрическое поле тангенциально и практически отсутствует внутри покрытия, чем и обусловлена слабая зависимость отраженной волны от его свойств.

Проблемой использования моды TE_{01} круглого волновода является то, что это мода высшего типа, и любые простые возбудители поля в волноводе, наряду с этой модой, будут генерировать и высшие типы волн, которые могут привести к значительной погрешности измерений. Наиболее простым способом выделения полезного сигнала в этих условиях является резонансный метод. Благодаря различию постоянных распространения различных мод, резонансы моды TE_{01} и паразитных для рассматриваемого применения мод наблюдаются на разных частотах, а информативным параметром датчика толщиномера является сдвиг резонансной частоты. Разработана программа расчета резонансных частот резонатора на моде TE_{01} для различных размеров датчика и диэлектрической проницаемости заполнения. На рис. 1 показаны частоты трех первых резонансов датчика, заполненного поликором, при диаметре волновода 10 мм.

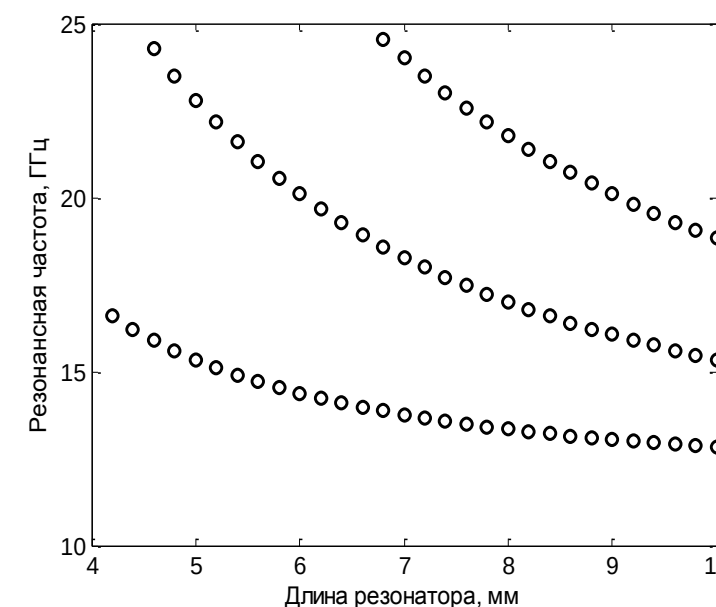


Рис. 1. Частоты резонанса датчика на моде TE_{01} при диаметре датчика 10 мм и заполнении поликором с диэлектрической проницаемостью 9,6

Приведенный график полезен также тем, что с его помощью можно предварительно оценить чувствительность датчика к толщине покрытия.

С использованием данных рис. 1, для конструирования датчика толщиномера выбран диапазон частот в окрестности 16 ГГц при длине полуволнового резонатора около 5 мм. Такой датчик был изготовлен с использованием генератора на микросхеме НМС506LP4 с удвоением частоты, а в качестве детектора выбрана микросхема LTC5564. Кроме того, для повышения точности измерений в конструкции резонатора предусмотрены кольцевые канавки, обеспечивающие разнесение резонансов вырожденных

В. А. МИХНЁВ

ГНУ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»

Минск, Беларусь

Толщинометрия покрытий относится к числу наиболее развитых разделов неразрушающего контроля. Отлично зарекомендовали себя приборы, основанные на магнитном и токовихревом методах контроля. Их известный недостаток заключается в необходимости калибровки прибора на образце того же металла, что и использован в контролируемой детали с покрытием. Известны также и микроволновые методы и средства измерения толщины покрытий. Однако по совокупности параметров они уступают распространенным на рынке аналогам, в основном по причине чувствительности к свойствам покрытия. При этом калибровка толщиномера по образцам покрытия трудоемка, а зачастую и вообще невозможна, как, например, в автомобильной промышленности, где применяются многослойные покрытия из разных материалов.

Проблема зависимости сигналов микроволновых датчиков от свойств покрытия, которая существенно усложняет их внедрение, также в принципе разрешима. Установлено, что фаза нормально падающей плоской электромагнитной волны при отражении от диэлектрического слоя на металле практически не зависит от диэлектрических свойств слоя при условии, что его электрическая толщина много меньше длины волны [1]. Этот факт может быть использован для создания датчика толщиномера, обладающего при малых толщинах покрытия свойством безэталоности.

Вместе с тем, при типичном для толщинометрии диапазоне измеряемых толщин до 1 мм, датчик должен иметь субволновые размеры. Естественными кандидатами на роль субволновых микроволновых датчиков являются открытые концы линий передачи. Однако моделирование показало, что структура поля в окрестности открытых концов волноводов и коаксиалов заметно искажается из-за наличия продольных токов в стенках. Вследствие этого, в раскрыве возникают нормальные компоненты поля, и свойство нечувствительности фазы отраженной волны к диэлектрической проницаемости теряется.

Следовательно, для решения задачи требуется линия передачи, волна в которой распространяется при отсутствии продольных токов в стенках. Известно, что таким свойством обладает мода TE_{01} круглого металлического волновода – токи в его стенках концентрические. Изучение структуры поля этой волны в раскрыве при отражении от тонкого покрытия на металле проводилось с использованием симулятора CST Microwave Studio. Резуль-

Преобразователь состоит из первой 1 и второй 2 индукционных катушек, расположенных соосно и включенных встречно, и кожуха 3 из магнитомягкого материала, охватывающего катушки и соосного с ними. При этом катушки содержат одинаковые количества витков, расположены на расстоянии L друг от друга симметрично относительно кожуха, длина которого вдоль оси катушек составляет не менее $2L$.

Намагниченное изделие 4 (оптимальные параметры преобразователя будут получены при контроле изделий, имеющих длину l , при $L < l < 2L$) при движении сквозь преобразователь вызывает в плоскостях расположения катушек 1 и 2 изменение магнитного потока, сцепленного с катушками. На выходах катушек 1 и 2 индуцируются ЭДС $\varepsilon_1(t)$ и $\varepsilon_2(t)$, амплитудно-временные диаграммы которых приведены на рис. 1.

Полярность первой полу волны ЭДС $\varepsilon_1(t)$ и $\varepsilon_2(t)$ определяется направлением (знаком) остаточной намагниченности в изделии 4 относительно направления его движения. ЭДС $\varepsilon_1(t)$ и $\varepsilon_2(t)$, индуцируемые на выходах катушек 1 и 2 изделием 4, имеют одинаковую полярность. Включены измерительные катушки встречно. Но за счет того, что катушки 1 и 2 расположены на расстоянии L друг от друга, для прохождения которого изделию необходимо затратить время $[t_1, t_4]$ (рис. 1), ЭДС $\varepsilon_1(t)$ и $\varepsilon_2(t)$ не компенсируют друг друга, а формируют сигнал $\varepsilon(t)$. Информационным параметром сигнала $\varepsilon(t)$ преобразователя является интеграл F от однополярного импульса сигнала $\varepsilon(t)$, соответствующего интервалу времени $[t_3, t_8]$. По закону электромагнитной индукции величина F не зависит от скорости движения изделия сквозь преобразователь, а определяется только суммарным магнитным потоком сцеплением изделия с обмотками 1 и 2 в моменты времени t_3 и t_8 , то есть величиной Φ_0 остаточного магнитного потока в изделии и чувствительностью S преобразователя к величине Φ_0 . При этом моменты времени t_3 и t_8 начала и конца интегрирования более строго локализованы во времени чем моменты времени t_1, t_4, t_7 и t_{10} , в которые намагниченное изделие начинает и заканчивает взаимодействие с индукционными катушками 1 и 2 преобразователя. Это обеспечивает высокую точность преобразователя. Чувствительность S преобразователя к величине Φ_0 повышается не только за счет суммирования сигналов $\varepsilon_1(t)$ и $\varepsilon_2(t)$ первой и второй катушек 1 и 2 в сигнале $\varepsilon(t)$ преобразователя в интервале времени $[t_3, t_8]$ его интегрирования. Одновременно кожух 3 препятствует распространению поля от намагниченного изделия 4 в окружающее пространство и создает внутри себя подмагничивающее поле, пропорциональное остаточной намагниченности изделия. Магнитный поток в малогабаритном изделии 4 в подмагничивающем поле кожуха 3 увеличивается пропорционально величине Φ_0 . Также увеличивается и информационный сигнал $\varepsilon(t)$ преобразователя в интервале времени $[t_3, t_8]$ его интегрирования. Это увеличение сигнала $\varepsilon(t)$, происходящее без увеличения сигнала от электромагнитной помехи, повышает отношение сигнал/шум и точность преобразователя.

Влияние поля помехи на сигнал преобразователя в значительной мере ослабляется и потому, что катушки преобразователя имеют одинаковые магнитные моменты и включены встречно. Кроме этого увеличение отношения сигнал/шум и точность преобразователя повышаются благодаря существенному экранированию индукционных катушек преобразователя и намагниченного изделия 4 от влияния поля магнитной помехи кожухом 3. Кожух 3 существенно ограничивает и влияние внешнего стационарного магнитного поля на намагниченное изделие 4 при измерении остаточного магнитного потока в нем.

Преобразователь реализован для измерения остаточного магнитного потока в болтах длиной 50 мм диаметром 6 мм из стали 30ХГСА. Катушки преобразователя имели внутренний диаметр 20 мм, длину 5 мм, содержали по 1000 витков провода диаметром 0,14 мм и были расположены на расстоянии 40 мм друг от друга. Кожух внутренним диаметром 38 мм был изготовлен из листового электротехнического железа толщиной 0,5 мм и имел длину 10 см. Намагниченные болты свободно падали сквозь преобразователь вдоль направляющей с внутренним диаметром 1 см. Интегрирование однополярного импульса сигнала преобразователя и индикация результата измерения производились измерительным каналом прибора МАКСИ (АНБ-692) [1]. Результаты сопоставительного анализа предложенного преобразователя с преобразователем прибора МАКСИ (АНБ-692) показали увеличение чувствительности предложенного преобразователя к величине остаточного магнитного потока в болтах в 2,5 раза, в том числе за счет использования кожуха из магнитомягкого материала в 1,16 раза (при коэрцитивной силе H_c изделия 700 А/м площадь однополярного импульса сигнала преобразователя по изобретению составила 1,75 мкВ·с, а у преобразователя прибора МАКСИ (АНБ-692) – 0,7 мкВ·с). Влияние электромагнитной помехи от близко расположенного источника (катушки, включенной в сеть 50 Гц) на сигнал предложенного преобразователя при прочих равных условиях снижено в 2–4 раза (в зависимости от расположения источника помехи). Влияние направления вертикальной составляющей поля Земли относительно направления остаточной намагниченности изделия на результат измерения остаточного магнитного потока в изделии снижено при использовании предложенного преобразователя в 7 раз (при H_c изделия 700 А/м – с ± 8 до $\pm 1,2$ %).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сандомирский, С. Г. Магнитный контроль физико-механических свойств изделий массового производства в движении (Обзор) / С. Г. Сандомирский // Дефектоскопия. – 1996. – № 7. – С. 24–46.

E-mail: sand@iaph.bas-net.by

подтверждается табл. 2, в которой приведены данные, полученные после порезки сборочной единицы Б-400, изготовленной ОАО «Металлист-Самара»; толщины хрома, никеля и прослойки определены методом металлографии.

Табл. 2. Результаты контроля прибором МТДП-1 толщины никеля под хромом, полученные на фрагментах сборочной единицы Б-400

№ точки	1	2	3	4	5	6	7
Сечение А (толщина прослойки от 7,1 до 7,2 мм)							
Толщина хрома, мкм	110	120	125	115	95	95	100
Толщ. ник. (металл.), мкм	450	440	420	420	430	445	450
Показание прибора, мкм	442	448	444	428	413	416	432
Погрешность, %	–1,8	+1,8	+5,7	+1,9	–4,0	–6,5	–4,0
Сечение Б (толщина прослойки от 5,3 до 5,6 мм)							
Толщина хрома, мкм	95	85	85	90	90	100	100
Толщ. ник. (металл.), мкм	385	405	385	365	350	340	400
Показание прибора, мкм	392	405	387	368	345	336	354
Погрешность, %	+1,8	0	+0,5	+0,8	–1,4	–1,2	–11,5
Сечение В (толщина прослойки от 6,4 до 6,5 мм)							
Толщина хрома, мкм	100	105	105	105	85	85	90
Толщ. ник. (металл.), мкм	410	370	370	385	385	395	400
Показание прибора, мкм	393	390	387	379	358	361	373
Погрешность, %	–4,1	+5,4	+4,6	–1,6	–7,0	–8,6	–6,8
Сечение Г (толщина прослойки от 4,7 до 4,8 мм)							
Толщина хрома, мкм	115	110	120	115	95	95	105
Толщ. ник. (металл.), мкм	460	440	435	460	460	450	475
Показание прибора, мкм	437	442	438	448	421	407	432
Погрешность, %	–5,0	+0,5	+0,7	–2,6	–8,5	–9,6	–9,1

Из табл. 2 видно, что при вариации в контрольных сечениях А–Г толщины хрома, никеля, прослойки в диапазонах (85–125), (340–475) мкм, (4,7–7,2) мм погрешность контроля практически не выходит за пределы ± 10 %. Прибор МТДП-1 обеспечивает контроль никелевых покрытий камер сгорания под хромовыми с приемлемой точностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лухвич, А. А. Возможности магнитодинамического метода контроля толщины двухслойных покрытий / А. А. Лухвич, О. В. Булатов // Дефектоскопия. – 2008. – № 10. – С. 26–34.
2. Лухвич, А. А. Возможности магнитодинамического метода контроля толщины покрытий с неоднородными свойствами / А. А. Лухвич, О. В. Булатов, А. Л. Лукьянов // Дефектоскопия. – 2009. – № 11. – С. 46–53.
3. Лухвич, А. А. Контроль толстослойных никелевых покрытий на двухслойных (неферромагнетик-ферромагнетик) основаниях магнитодинамическим методом толщинометрии / А. А. Лухвич, О. В. Булатов, А. Л. Лукьянов // Дефектоскопия. – 2014. – № 4. – С. 3–12.

E-mail: lab1@bas-net.by

Табл. 1. Намагниченность центральной области информативной зоны

Толщина никеля, мкм	Толщина хрома, мкм	Намагниченность, кА/м	Толщина хрома, мкм	Намагниченность, кА/м
200	0	498,7	150	487,5
700	0	469,3	150	455,3

Рис. 1 показывает, что сигнал вышеуказанного преобразователя незначительно зависит от толщины хрома. Следовательно, в некоторых ее пределах (до ~200 мкм) можно контролировать толщину никеля с небольшой погрешностью.

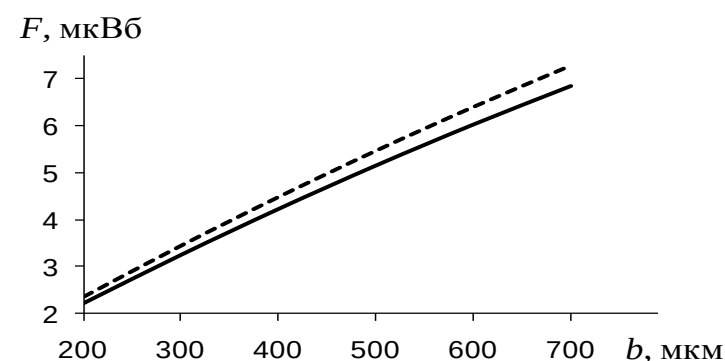


Рис. 1. Расчетная зависимость информативного сигнала F от толщины b никеля до и после нанесения хрома толщиной 150 мкм (штриховая и сплошная кривые соответственно)

На рис. 2 приведена погрешность Δ_{sum} , обусловленная намагниченностью корпуса камеры и хромом, при вариации толщин прослойки в диапазоне 2–10 мм и хрома 0–150 мкм. Видно, что по мере возрастания обеих толщин, влияние намагниченности корпуса существенно снижается, однако, в целом ее компенсация по-прежнему необходима.

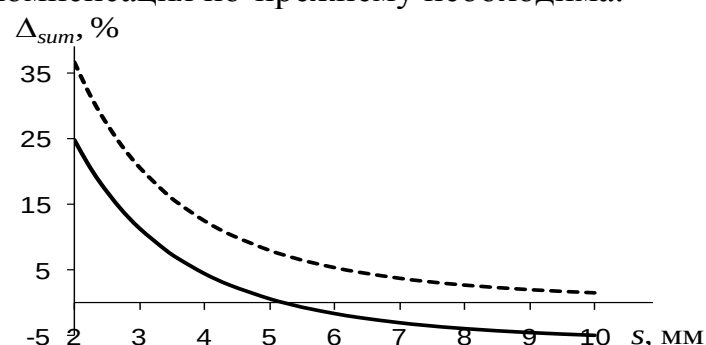


Рис. 2. Расчетная зависимость погрешности Δ_{sum} от толщины s неферромагнитной прослойки при толщине никеля 400 мкм до и после нанесения хрома толщиной 150 мкм (штриховая и сплошная кривые соответственно)

По результатам комплексных исследований специально для камер сгорания разработан магнитодинамический толщиномер МТДП-1, обеспечивающий контроль никелевых покрытий толщиной до 700 мкм; под хромовыми толщиной до 150 мкм с основной погрешностью до $\pm (1,5 + 10 \%)$ мкм. Прибор сертифицирован в Российской Федерации (Госреестр РФ № 50930-12, свидетельство № 47796). Его эффективность

УДК 621.317.43 МЕТОД И ПРИБОР ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В МАЛОМОЩНЫХ ТОРОИДАЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

И. Т. СКУРТУ, А. С. ЕРОШЕНКО, И. И. БРАНОВИЦКИЙ
ГНУ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»
Минск, Беларусь

Витковые замыкания в обмотках трансформаторов – одна из распространенных проблем при их изготовлении и эксплуатации. Всего один не выявленный вовремя короткозамкнутый (КЗ) виток существенно снижает надежность устройства. В случае мощных трансформаторов дефектные витки легко детектируются по существенному нарушению режима работы. В то же время для трансформаторов малой мощности (единицы Ватт и менее) влияние КЗ витка при толщине провода порядка 0,1 мм на работу устройства не столь заметно и стандартный метод контроля (по току холостого хода) не позволяет выявить присутствие одного КЗ витка на фоне нескольких тысяч. В связи с этим для трансформаторов малой мощности требуется более чувствительный метод.

Такой метод был разработан в Институте прикладной физики НАН Беларуси и реализован в диагностическом приборе ТВ (тестер витковый) – внешний вид приведен на рис. 1. Данный прибор [1] был внедрен на участке контроля качества трансформаторов ООО «Юджэн», г. Новополоцк (предприятие специализируется на производстве тороидальных трансформаторов).



Рис. 1. Общий вид диагностического прибора ТВ: 1 – электронный блок; 2 – гибкая измерительная катушка и контролируемый тороидальный трансформатор; 3 – ЭВМ

Один отдельный виток и обмотка из витков такого же диаметра, при фиксированной частоте, имеют разное отношение активной и реактивной части импеданса (у единичного витка оно значительно больше). Вследствие этого, при увеличении частоты питающего напряжения и сохранении его амплитуды, относительное снижение тока в витках обмотки будет больше, чем в одном витке. Иными словами – происходит виртуальное

увеличение отношения ампер-виток для отдельно взятого витка, что приводит к росту неоднородности распределения индукции по продольному сечению магнитопровода и может быть зафиксировано.

Фундаментальной и наиболее принципиальной характеристикой, отражающей возможность детектирования (с учетом доступной чувствительности и уровня шумов) одного короткозамкнутого витка на фоне многих исправных, является отношение:

$$s = \frac{1}{w_{max}}, \quad (1)$$

где w_{max} – максимальное количество витков среди обмоток данного трансформатора. С учетом вышесказанного, при повышении частоты питающего напряжения и сохранении его амплитуды происходит увеличение отношения (1) и его преобразование к виду:

$$s(\omega) = \frac{w_v(\omega)}{w_{max}}, \quad (2)$$

где w_v – количество “создаваемых” повышением частоты виртуальных КЗ витков, ω – угловая частота питающего напряжения.

Зависимость (2) с ростом частоты (без учета вихревых токов в стальном магнитопроводе) асимптотически стремится к фиксированному значению, поскольку отношение импедансов обмотки и витка почти не меняется при значительном доминировании в обоих случаях реактивной составляющей импеданса. Это позволяет оценивать потенциал чувствительности метода (например, для ферритовых сердечников, где вихревые токи не играют заметной роли в полосе частот, включающей достаточную для оценки часть), а также выбирать диагностическую частоту для стальных сердечников в том диапазоне, где эквивалентная магнитная проницаемость снижается медленнее, чем растет частота. Практически, отношение (2) заменяется отношением модулей импедансов обмотки к витку.

Порядок варьирования неоднородностей в распределении магнитной индукции вследствие наличия одного короткозамкнутого витка составляет десятитысячные доли Тесла. Для обнаружения этой неоднородности была разработана гибкая многовитковая измерительная обмотка, представляющая собой спираль из провода минимально допустимого диаметра, сосредоточенная в изоляционном покрытии.

Упомянутое ранее отношение импедансов обмотки и витка определялось расчетно-экспериментально и представлено на рис. 2.

В процессе экспериментальных исследований устойчивое детектирование одного короткозамкнутого витка (диаметр 0,1 мм) на фоне 4000 исправных фиксировалось с частоты в несколько сотен герц.

УДК 620.179.14

КОНТРОЛЬ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ КАМЕР СГОРАНИЯ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСЛЕ НАНЕСЕНИЯ ХРОМОВЫХ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ТОЛЩИНОМЕТРИИ

А. А. ЛУХВИЧ, А. Л. ЛУКЬЯНОВ, О. В. БУЛАТОВ,

*М. Н. ПОЛЯКОВА, *В. В. МОСЯКИН

ГНУ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»

*ОАО «МЕТАЛЛИСТ-САМАРА»

Минск, Беларусь; Самара, Россия

Камера сгорания любого ракетного двигателя, в общем случае, представляет собой ферромагнитный корпус с бронзовой прослойкой, на которую гальваническим методом наносятся никель и хром, обеспечивающие тепловую защиту камеры, при этом последовательно осуществляется контроль толщины никеля и затем хрома. В работе обоснована возможность определения толщины никеля под хромом магнитодинамическим методом на любой стадии изготовления или испытаний камеры (включая приемку).

Магнитодинамический метод является оптимальным при контроле никелевых покрытий в диапазоне 0...1000 мкм [1]. При этом решена проблема минимизации или устранения дополнительной погрешности, обусловленной вариацией структурных (магнитных) свойств никеля, за счет использования преобразователя, первичное намагничивающее поле которого обеспечивает в информативной зоне намагниченность никеля, близкую к его намагниченности насыщения [2]. Также решен вопрос устранения влияния на точность измерений намагниченности корпуса камеры [3].

При решении рассматриваемой задачи возникает дополнительная погрешность, обусловленная влиянием хрома на информативный сигнал при контроле толщины никеля. На практике толщина хрома меняется в диапазоне 50–200 мкм, никеля под хромом – 200–700 мкм. Рассмотрим в какой мере изменится при этом намагниченность никеля под хромом и, следовательно, дополнительная погрешность, обусловленная структурной вариацией никеля.

Данные в табл. 1 получены методом конечных элементов для магнитодинамического преобразователя, создающего достаточно сильное намагничивающее поле [1, 2]. В этом случае намагниченность центральной области информативной зоны, преимущественно формирующей информативный сигнал, близка к намагниченности насыщения никеля и даже после нанесения толстослойного хрома практически не меняется. Это свидетельствует о том, что при любой толщине хрома, структурная вариация никеля также не оказывает заметного влияния на результаты контроля, следовательно, вышеуказанная погрешность незначительна.

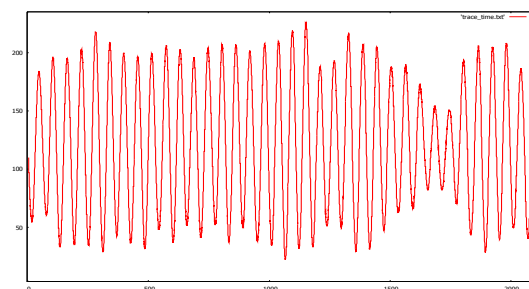


Рис. 2. Зависимость амплитуды автоколебаний бифилярного маятника (отн. ед.) в установившемся режиме от времени (сек). Период колебаний 66 сек

Чтобы убедиться, что автоколебания действительно связаны с вращением Земли, был проведен дополнительный эксперимент. Штатив с маятником помещали на вращающуюся платформу с компенсацией угловой скорости вращения Земли (12° в час на широте Могилева). Автоколебания в этом случае становились затухающими и постепенно исчезали.

Для периода колебаний, равного 66 секундам измеренное значение угла динамического равновесия α для бифилярного маятника с параметрами, приведенными выше, равно $+12^\circ$ (положение центра колебаний повернуто по часовой стрелке). Изменение периода колебаний за счет изменения расстояния b , дает значения угла α для периодов колебаний 45 и 20 секунд 8° и $3,6^\circ$.

Расчеты динамики автоколебаний во вращающейся системе отсчета, требует использования достаточно сложной нелинейной компьютерной математической модели, которая описывает приведенные выше особенности маятника.

При использовании крутильных маятников в измерительных системах необходим учет влияния вращения Земли на их свойства.

Таким образом, исследовано новое механическое явление - автоколебания бифилярного маятника, возникающие вследствие вращения Земного шара.

Автоколебания бифилярного маятника и отклонение его положения равновесия от плоскости подвеса, наряду с маятником Фуко, можно рассматривать как еще одно наглядное подтверждение абсолютного вращения системы отсчета, связанной с Земным шаром.

Бифилярный маятник в режиме автоколебаний является своеобразным «вечным двигателем», извлекающим энергию из энергии вращения земного шара.

Такой маятник может устанавливаться в учреждениях образования для использования в лабораторных работах и для наглядной демонстрации эффекта вращения земного шара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Андронов, А. А.** Теория колебаний / А. А. Андронов, А. А. Витт, С. Э. Хайкин. – М. : Наука, 1937.
2. **Харкевич, А. А.** Автоколебания / А. А. Харкевич. – М. : ГИТТЛ, 1954.
3. **Сивухин, Д. В.** Общий курс физики. Механика / Д. В. Сивухин. – М. : 1979. – с. 213.

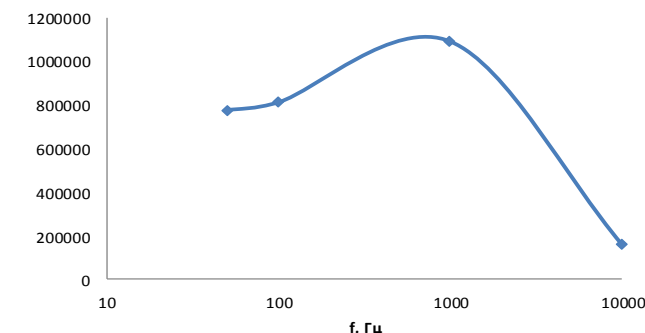


Рис. 2. Отношение импеданса намагничивающей обмотки к импедансу одного короткозамкнутого витка в зависимости от частоты

Посредством зависимости, представленной на рис. 2 можно сделать оценку чувствительности метода применительно к группе трансформаторов с данным минимальным диаметром провода. Обозначая:

$$k = \frac{|Z_{coil}|}{|Z_1|}, \quad (3)$$

где Z_{coil} и Z_1 импедансы обмотки и витка, имеем:

$$N_{max} = 4000 \cdot \ln \frac{k_{max}}{k_{start}}. \quad (4)$$

Здесь N_{max} – максимальное число витков в обмотке, на фоне которых можно выявить виток, k_{max} – максимальное значение отношения (3), k_{start} – значение отношения (3) при частоте начального обнаружения. Для указанного диаметра 0,1 мм оценка N_{max} составляет около 11000 витков.

Таким образом, разработанный метод и созданный на его основе прибор ТВ для диагностирования обмоток тороидальных трансформаторов принципиально позволяет решать задачу контроля витковых замыканий в одном из наиболее сложных, с точки зрения надежной выявляемости КЗ витка, случаев – при предельно малой толщине провода и большом общем количестве витков в их обмотках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пат. 9492 Респ. Беларусь, МПК⁸ G 01R 31/06.** Устройство для обнаружения короткозамкнутых витков в обмотках тороидальных трансформаторов / И. Т. Скурту, И. И. Брановицкий, Г. И. Размыслович; заявитель и патентообладатель ГНУ Институт прикладной физики НАН Беларуси. – № u 20130133; заявл. 12.02.13, опубл. 13.08.13.

E-mail: branovitsky@iaph.bas-net.by

И. Т. СКУРТУ, И. И. БРАНОВИЦКИЙ
 ГНУ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»
 Минск, Беларусь

Задачи, связанные с расчетом стационарных динамических магнитных процессов, можно свести к получению вебер-амперной характеристики $\Phi(I)$ на фиксированной частоте перемагничивания. Основная кривая намагничивания конкретного материала и вебер-амперная характеристика изделия связаны между собой через зависимость длины среднего магнитного пути $l_{\text{ср}}$ от внешнего намагничивающего поля.

Расчет длины среднего магнитного пути как в квазистатике, так и в динамике связан с вычислением интеграла от тангенциальной компоненты $H_{\parallel}$ магнитного поля по поверхности образца $S_{\text{изм}}$, находящейся в пределах измерительной обмотки:

$$l_{\text{ср}}(H) = \frac{S_{\text{изм}} I \omega_{\text{намагн}}}{\iint H_{\parallel} dS_{\text{изм}}}, \quad (1)$$

где I — ток в намагничивающей обмотке, $\omega_{\text{намагн}}$ — количество витков в намагничивающей обмотке.

Выражение (1) является обобщением применения закона полного тока на динамические режимы перемагничивания, в которых он используется для поля на поверхности. Расчетная практика показывает, что при прочих равных условиях, различные режимы перемагничивания (статика, динамика, постоянная проницаемость, переменная проницаемость) находятся достаточно близко друг от друга в пространстве значений функции (1). Переходы между двумя различными режимами могут быть осуществлены в несколько этапов при помощи последовательных приближений с использованием функций связи режимов. При этом соотношения затрат машинного времени на расчет одной и той же задачи при смене режимов перемагничивания может составлять около двух порядков (в случае прямого решения методом конечных элементов).

Изменение длины среднего магнитного пути в зависимости от проницаемости связано с изменением соотношения между тангенциальной и нормальной компонентами магнитного поля на поверхности образца. При этом закон полного тока в магнитных измерениях используется именно по отношению к тангенциальной составляющей, что обусловлено требованиями однородности (по направлению) измеряемых величин.

Расчет функций связи режимов может быть выполнен без проведения вычислений в наиболее затратном режиме (что требует ресурсов супер-

движения воздуха и колебаний пола в лаборатории не оказывают существенного влияния на автоколебания.

Количественно временная картина автоколебаний регистрировалась путем видеосъемки движения луча лазера на экране. Луч лазера отражался от вспомогательного зеркала, закрепленного в центре пластины. Построение графика временной зависимости амплитуды автоколебаний от времени осуществлялось с помощью специальной компьютерной программы.

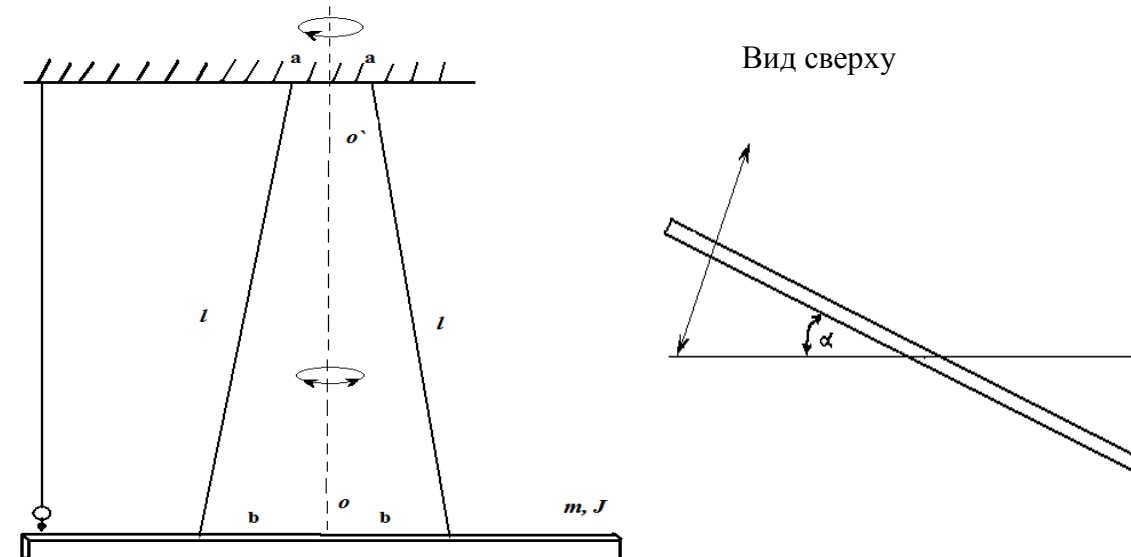


Рис. 1. Бифилярный маятник: α — определяет угол динамического равновесия маятника относительно положения статического равновесия

Период колебаний можно было изменять в пределах 10 ... 180 с, причем, измеренное значение периода соответствовало стандартной формуле, приведенной в учебнике [3].

В отличие от свободных колебаний маятника, симметричных относительно положения равновесия, автоколебания всегда несимметричны. Угол отклонения пластины α всегда оказывается смещенным относительно положения статического равновесия по часовой стрелке противоположно направлению вращения Земли. Это непосредственно можно наблюдать по смещению тела маятника относительно отвеса, закрепленного на опорной поверхности на прямой линии, содержащей точки подвеса маятника.

За время наблюдений, составляющих многие часы, автоколебания не затухают и не выходят на режим стационарных колебаний, а испытывают нерегулярные биения. Период биений в зависимости от параметров маятника составляет десятки периодов его собственных резонансных колебаний. Это означает, что фазы периода колебаний маятника и периода вращения подвеса периодически рассогласовываются. Для колебаний малой мощности на их амплитуду накладываются шумовые колебания, связанные с воздушными потоками в лаборатории и паразитными механическими колебаниями установки.

ВЛИЯНИЕ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ НА КОЛЕБАНИЯ
КРУТИЛЬНОГО МАЯТНИКА

В. И. ЛЕБЕДЕВ, А. Б. СОТСКИЙ, Е. О. КОТЯШЕВ
УО «МОГИЛЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. А.А. Кулешова»
Могилев, Беларусь

Крутильные маятники широко используют в различных измерительных системах. Они использовались, в частности, в классических экспериментах Кулона и Кавендиша. Обычно влияние вращения Земли на колебания маятника не учитывается, что, например, в случае опыта Кавендиша по измерению гравитационной постоянной может приводить к ошибкам в измерениях.

Колебания маятника относятся к самым древним физическим явлениям, его исследуют экспериментально и теоретически уже более 400 лет. Колебания маятника рассматривают во всех учебниках механики [1, 2]. Тем не менее, сведения о самопроизвольных (без использования источников внешней энергии) автоколебаниях маятника в литературе не обнаруживаются.

Маятник Фуко (1851 г.) использовался для наглядной демонстрации суточного вращения Земли и производит большое впечатление на зрителей до настоящего времени. Такие маятники установлены в некоторых учреждениях образования.

Маятник Фуко является обычным математическим маятником. После возбуждения внешним толчком плоскость его колебаний постепенно поворачивается относительно земной поверхности в сторону, противоположную направлению вращения Земли.

Малые крутильные автоколебания тела авторами были обнаружены случайно для зеркала на бифилярном подвесе. Для увеличения амплитуды автоколебаний потребовалось использование тела с более высокими значениями массы и момента инерции. В конечном варианте установки в качестве колеблющегося тела использовалась дюралевая пластина массой 72 г длиной 78 см и сечением 12х5 мм, иногда с дополнительными грузами, устанавливаемыми на ее концах. Пластина подвешивалась двумя нитями длиной 1,2 м на штативе. Расстояния между точками крепления нитей на опоре и на пластине можно изменять, регулируя тем самым период колебаний.

Штатив устанавливался на оптической скамье, развязанной от механических колебаний пола лаборатории. При определенном наборе параметров маятника максимальный угол отклонения пластины от положения равновесия может достигать 30 градусов. В этом случае флуктуации из-за

компьютера и не является универсальным решением). Для этого предлагается использовать свойства геометрии магнитной цепи, не зависящие (инвариантные) от режима перемагничивания.

К основным функциям связи относятся, прежде всего, зависимость эквивалентной проницаемости на фиксированной частоте от постоянной проницаемости и группа зависимостей проницаемостей от величины напряженности поля (тока в намагничивающей обмотке).

Расчет выполняется следующим образом:

1) методом конечных элементов вычисляется зависимость длины среднего магнитного пути конкретной магнитной цепи от величины задаваемой постоянной магнитной проницаемости $l_{cp}(\mu_{const})$;

2) аналитически, либо методом конечных элементов в 2D, определяется зависимость средней по сечению магнитной проницаемости конкретного образца от величины задаваемой постоянной магнитной проницаемости на фиксированной частоте перемагничивания $\mu_{equal}(\mu_{const})|_{f=const}$;

3) выполняется оценка зависимости средней проницаемости образца от амплитуды внешнего магнитного поля в динамике при переменной проницаемости (реальная кривая намагничивания). Данная зависимость представляет собой кривую, находящуюся между зависимостями такого же типа для постоянной проницаемости в статике и динамике. Оценка положения такой кривой (например, по среднему значению зависимости из пункта 1 или другим эмпирическим схемам) позволяет с необходимой точностью получить зависимость длины среднего магнитного пути от величины внешнего магнитного поля в динамике для реальной кривой намагничивания. Следует отметить, что данная схема является работоспособной для замкнутой магнитной цепи, поскольку ошибка определения длины среднего магнитного пути в среднем на три порядка ниже ошибки определения средних проницаемостей.

В каждом конкретном случае для произвольной магнитной цепи необходимо делать оценку ошибки, возникающей при расчете ресурсосберегающими методами. В случае высокой чувствительности усредненных магнитных характеристик к точности определения магнитных свойств необходимо оперировать схемами расчета отношений полевых величин (точность для которых всегда намного выше, чем для расчета абсолютных величин), а также использовать эквивалентные (по интегральным характеристикам) цепи.

E-mail: tisotta@tut.by

УДК 620.179.118.415.05
ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ КОЭФФИЦИЕНТА
НОРМАЛЬНОЙ АНИЗОТРОПИИ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА СТАЛИ
ИМПУЛЬСНЫМ МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ

А. С. СЧАСТНЫЙ, А. А. ОСИПОВ
ГНУ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»
Минск, Беларусь

Весьма актуальной в практике использования листового проката сталей является пригодность исходного материала к штамповке и глубокой вытяжке. Для этого используют коэффициент нормальной анизотропии R_n , вычисляемый по результатам механических испытаний [1]. На производстве постоянно решается вопрос по уменьшению затрат, связанных с образованием брака в процессе штамповки.

Важную роль в данном вопросе играют методы неразрушающего магнитного контроля, но проблемой при их использовании является то, что область контроля меньше размеров контролируемого образца, а в плоскости листа существует значительная неоднородность магнитных свойств. Эта неоднородность по длине рулона колеблется в пределах десятков процентов [2, 3], причем расстояние между пиками измеряемых значений магнитных величин может не превышать 200 мм. Расположение пиков и их значения являются величинами случайными и не поддающимися простому описанию. В [3] фактически не обнаружено общих закономерностей для распределения неоднородности магнитных свойств. По длине и ширине ленты наблюдаются локальные неоднородности магнитных свойств, которые являются следствием высокотемпературного отжига и отжига, предназначенного для исправления рулонной кривизны.

Исследования, проведенные импульсным магнитным методом на образцах низкоуглеродистой холоднокатаной стали (производства ЕКО STANL GmbH, Германия), показали, что коэффициент корреляции R между величиной остаточной намагниченности и нормальным коэффициентом анизотропии при расположении намагничивающей и измерительной системы в центре исследуемого образца не превышал 0,6.

Механические испытания проводились на участках листового проката, где вырезались пластины в направлениях 0° , 45° и 90° (по три на каждое направление) относительно направления прокатки. Для каждого из этих направлений на участке равномерной деформации при испытаниях на растяжение измерялся коэффициент анизотропии R_φ .

Для выявления магнитной анизотропии образцов листового проката в каждом из направлений (0° , 45° и 90°) при измерении создавалось магнитное поле в плоскости листа. Направленное магнитное поле формировалось двумя прямоугольными плоскими катушками с размерами

(ДУ). На ДУ также поступает сигнал с генератора Г2. Разностный сигнал с выхода ДУ оцифровывается МК.

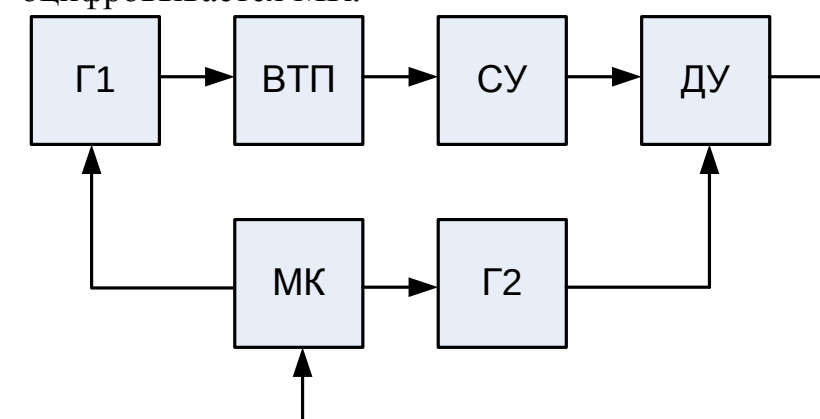


Рис. 1. Структурная схема компенсирующего устройства

По результатам оцифровки сигнала с ДУ для компенсации начального значения напряжения сигнала измерительной катушки МК автоматически задает амплитуду с точностью до единиц милливольт и начальную фазу с точностью до десятых долей градуса генератора Г2.

Данное устройство работает в широком диапазоне частот (от единиц герц до единиц мегагерц) и позволяет реализовать как фазовый метод вихревого контроля (сигнал на выходе генератора Г2 в таком случае прямоугольной формы, амплитуда выходного генератора Г1 максимальна и СУ выполняет роль компаратора), так и амплитудный метод (постоянный уровень сигнала на выходе генератора Г2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приборы неразрушающего контроля, разработанные в Институте прикладной физики НАН Беларуси. Лаборатория металлофизики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://iaph.bas-net.by/VDev/index>. – Дата доступа: 1.05.2014.
2. Неразрушающий контроль : справочник в 7 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2003. – Т. 2. – Кн. 2. – 471 с.

E-mail: lab5@iaph.bas-net.by

КОМПЕНСАЦИЯ НАЧАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ АБСОЛЮТНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРИ МНОГОЧАСТОТНОМ МЕТОДЕ КОНТРОЛЯ

И. Е. ЗАГОРСКИЙ

ГНУ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»

Минск, Беларусь

Одним из достоинств вихретокового неразрушающего контроля является простота конструкции и размеры вихретокового преобразователя (ВТП). В разработках института [1] используются трансформаторные абсолютные и дифференциальные ВТП с использованием ферритовых сердечников. В таких датчиках анализируется приращение комплексного напряжения сигнала в одной или двух встречно включенных измерительных катушках. Для абсолютных ВТП это приращение гораздо меньше (на порядок и более) начального значения напряжения сигнала, поэтому для выделения полезного сигнала используют различные способы компенсации начального сигнала. Частично или полностью компенсация проводится в дифференциальных ВТП и, например, для задач дефектоскопии этого способа компенсации достаточно. Однако когда речь идет о размерном контроле (дефектометрия, толщинометрия и др.) с использованием двухчастотного или многочастотного методов контроля, нужен более универсальный способ компенсации начального сигнала, позволяющий провести компенсацию до определенного уровня или полностью на воздухе, на разных металлах, что не обеспечивает дифференциальный ВТП. Известны устройства [2], позволяющие плавно регулировать активную и реактивную составляющую компенсатора, тем самым проводить компенсацию до уровня, необходимого для подавления мешающего фактора. Однако такие устройства требуют подстройки на разных частотах в ручном режиме, что делает контроль трудоемким, добавляя при этом дополнительную погрешность.

Структурная схема устройства компенсации начального значения напряжения сигнала абсолютного ВТП для дефектоскопа ВД115 НД-ШУ, разработанного ГНУ ИПФ НАНБ, представлена на рис. 1.

С помощью микроконтроллерного блока (МК) задаются начальные фазы, амплитуды, частоты двух генераторов (Г1 и Г2). Основными элементами генераторов являются микросхемы DDS AD9834. Важное свойство этих микросхем – возможность синхронизации с помощью МК для получения двух сдвинутых по фазе с точностью до долей градуса сигналов синусоидальной формы. Сигнал с измерительной катушки ВТП поступает на согласующий усилитель (СУ), затем на дифференциальный усилитель

210x55 мм², которые располагались на листе. Намагничивание осуществлялось импульсным магнитным полем, направленным вдоль и поперек направления прокатки.

Основными информативными параметрами, по завершении намагничивающего импульса для таких измерений, являются остаточные тангенциальные поля при намагничивании вдоль и поперек прокатки. Две остальные перпендикулярные компоненты существенно меньше основной и выявляют, в основном, уровень не идеальности проводимых измерений.

Проведены измерения в тех областях на листовом образце, в которых (при отсутствии неоднородности) измеряемые значения должны практически совпадать. В качестве таких областей для измерения были выбраны четыре положения на диагоналях прямоугольного образца, которые одинаково отстояли от его краев. Обычно измерения проводят в центре образца, что обеспечивает наименьшее влияние краев листа, используемые области не эквивалентны ей, поскольку при их использовании влияет край образца. Измерения в этих четырех областях показали, что коэффициенты корреляции вдоль и поперек прокатки не превышают 0,5, что заметно ниже, чем при измерении в центре образца.

Магнитные измерения, проведенные при смещении к области, из которой вырезались заготовки для механических испытаний, выявили увеличение коэффициента корреляции R до 0,72.

Коэффициент корреляции R может быть увеличен до 0,9, если наложить следующее условие: для исследований должны быть отобраны образцы с отклонениями измеренных значений в областях, расположенных вблизи зоны механических испытаний, не превышающими 10 %. Данный критерий, по сути, является требованием однородности свойств по ширине листа.

Таким образом, проведенные измерения показали, что возможен контроль коэффициентов нормальной анизотропии листов холоднокатаной низкоуглеродистой стали импульсным магнитным методом. Однако для получения высоких коэффициентов корреляции нужно к используемым образцам с разными коэффициентами нормальной анизотропии предъявлять более строгие требования по однородности свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шевелев, В. В.** Анизотропия листовых материалов и ее влияние на вытяжку / В. В. Шевелев, С. П. Яковлев. – М. : Машиностроение, 1972. – 133 с.
2. **Янус, Р. И.** О полистной неоднородности магнитных свойств электротехнического железа / Р. И. Янус. – ФММ, 1955. – Т. 1. Вып. 1. – С. 84–91.
3. Неоднородность магнитных свойств анизотропной электротехнической стали и особенности дислокационных структур / Б. К. Соколов [и др.] // Дефектоскопия. – 2004. – № 11. – С 69–78.

А. В. ХОМЧЕНКО, И. У. ПРИМАК, А. Н. ВАСИЛЕНКО
ГУ ВПО «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Могилев, Беларусь

Остаточные напряжения обеспечивают прочность закаленного стекла и обуславливают их безопасную эксплуатацию в автомобиле. Для их контроля традиционно применяются поляризационно-оптические методы исследования, основанные на измерении обусловленной этими напряжениями анизотропии оптических характеристик материала.

Измеряя интенсивность света можно анализировать и оценивать величину механических напряжений в отдельной точке стекла, и достаточно сложно это выполнить для протяженных анизотропных объектов. В данной работе анализируется метод контроля механических напряжений в автомобильных закаленных стеклах. Схема установки, реализующей такой подход, приведена на рис. 1.

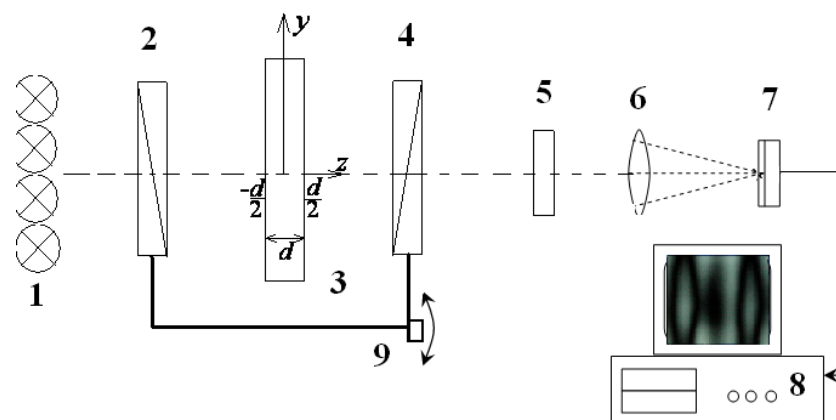


Рис. 1. Схема измерительной установки: 1 – источник света; 2 – поляризатор; 3 – контролируемое автомобильное стекло; 4 – анализатор; 5 – светофильтр; 6 – объектив; 7 – фоторегистрирующее устройство; 8 – компьютер; 9 – система поворота

В данном устройстве линейно поляризованный свет, пройдя через исследуемое стекло, в котором присутствуют механические напряжения, меняет состояние поляризации, проходит через анализатор и попадает в фоторегистрирующее устройство. При этом регистрируемая интенсивность света (рис. 2) является функцией двух координат и определяется как :

$$I(x, y) = I_p T (\cos^2 \chi - \sin 2\alpha \cdot \sin(2(\alpha - \chi)) \sin^2 \frac{\delta}{2}), \quad (1)$$

где $I = I(x, y)$, $I_p = I_p(x, y)$ – интенсивность света на выходе из поляризатора, $T = T(x, y)$ – коэффициент, учитывающий отражение света от поверхностей

На рис. 1, а показана схема измерений рассеянного излучения. В блоке источника посредством двух коллиматоров сформирован пучок бета-излучения в телесном угле 0,064 ср. Непосредственно вплотную к входному окну БД расположен поглотитель потока бета-частиц в виде стального диска диаметром 15 мм, отсекающий указанный пучок. За периферией поглотителя входное окно свободно и не препятствует прохождению, в нашем случае, рассеянных частиц за пределы телесного угла Ω . Рост интенсивности (см. рис. 1, б) в диапазоне до 100 г/м² объясняется расширением гауссовой формы углового распределения рассеянных частиц. Максимум на кривых и спад вызван переходом к диффузному рассеянию и ростом самопоглощения этих частиц по мере роста толщины (массы) пленки. Указанный ход кривых подтверждается моделированием по методу Монте-Карло прохождения моноэнергетических электронов для двух линий в непрерывном спектре Kr-85: 150, 246 кэВ с использованием демонстрационной программы PCLAB [1].

Для ослабления позиционной погрешности следует локализовать рассеянное излучение в более узком телесном угле. Эта задача решена при помощи разработанного коллиматора (рис. 2, а), устанавливаемого вплотную к ионизационной камере под входным окном БД.

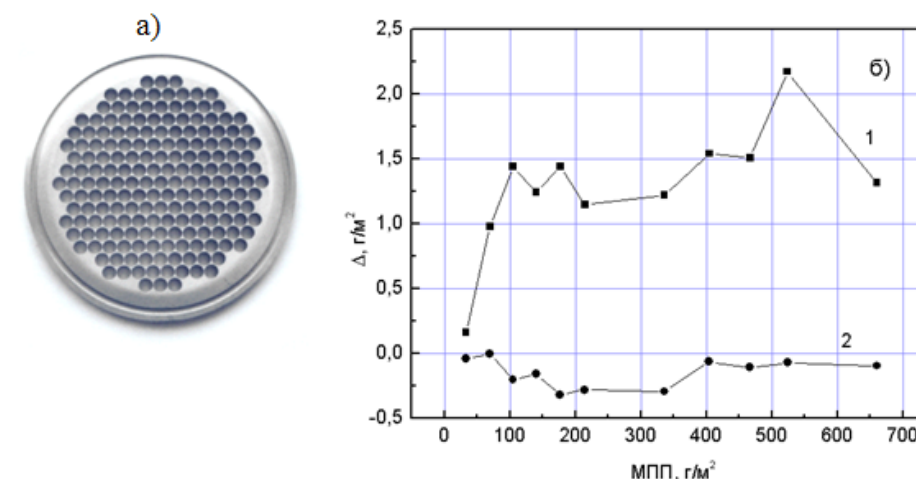


Рис. 2. Внешний вид коллиматора (а) и погрешности (б): для случая применения коллиматора (кривые 2) и без него (кривые 1)

Положительный эффект от применения коллиматора демонстрирует рис. 2, б, на котором показана погрешность Δ прибора, возникающая при смещении по вертикали каждой из МПП на 2 мм от середины измерительного зазора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беспалов, В. И. Программа PCLAB / В. И. Беспалов. – 2013. – (portal.tpu.ru/shared/b/bvi/pclab).

E-mail: ligeal@mail.ru

УДК 620.179
РАССЕЯНИЕ БЕТА-ИЗЛУЧЕНИЯ ЛИСТОВЫМ МАТЕРИАЛОМ
В ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ ЗАЗОРЕ РАДИОИЗОТОПНОГО ПЛОТНОМЕРА

О. Л. ЕРМАКОВИЧ, Г. А. ЛИСОВСКИЙ, И. А. ТИТОВИЦКИЙ
НИУ «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНЫХ
ФИЗИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ им. А. Н. Севченко» БГУ
Минск, Беларусь

Одной из проблем контроля массы 1 м^2 движущегося бумажного полотна на выходе бумагоделательной машины является погрешность, возникающая при смещении полотна от рабочего положения в измерительном зазоре радиоизотопного плотномера (позиционная погрешность). Указанный негативный фактор обусловлен изменением интенсивности рассеянного излучения, проникающего через входное окно блока детектирования (БД) в ионизационную камеру (ИК) и, как следствие, вызывающего изменение сигнала ИК, которое обрабатывающая программа ошибочно воспринимает как изменение массы.

Цель настоящей работы – изучение процессов рассеяния при взаимодействии бета-излучения с мерами поверхностной плотности (МПП) в виде пленок лавсана, калиброванных по ГОСТ 8171-75. В качестве излучателя использовался источник бета-частиц Кг-85 активностью 10 ГБк, смонтированный в блоке источника (БИ). Регистрация излучения осуществляется токовой ионизационной камерой LND 52024, размещенной в блоке детектирования (БД) с диаметром входного окна 70 мм. Выходной сигнал БД – цифровой в виде кода АЦП.

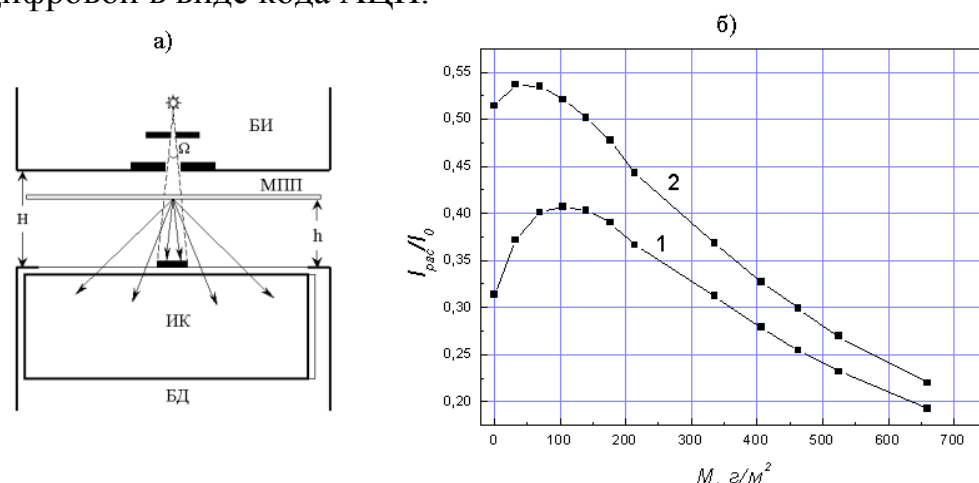


Рис. 1. Геометрия измерений (а) и интенсивность рассеянного излучения за пределами первичного пучка, коллимированного в телесном угле $\Omega = 0,064 \text{ ср}$ для различного положения МПП в измерительном зазоре толщиной $H = 27 \text{ мм}$: 1- $h = 22 \text{ мм}$, 2 – 15 мм ;

стекла, $\alpha = \alpha(x, y)$ – угол между оптической осью и плоскостью пропускания поляризатора, χ – угол между поляризатором и анализатором, $\delta = \delta(x, y)$ – разность фаз между обыкновенной и необыкновенной волнами.

Обработывая регистрируемые распределения интенсивности $I(x, y)$, можно восстановить разность фаз δ в каждой точке стекла и, учитывая ее взаимосвязь с напряжением, воспроизвести поле напряжений. Для определения δ вначале проводятся измерения интенсивности при некотором фиксированном (но произвольном) угле α и $\chi = 90^\circ$.

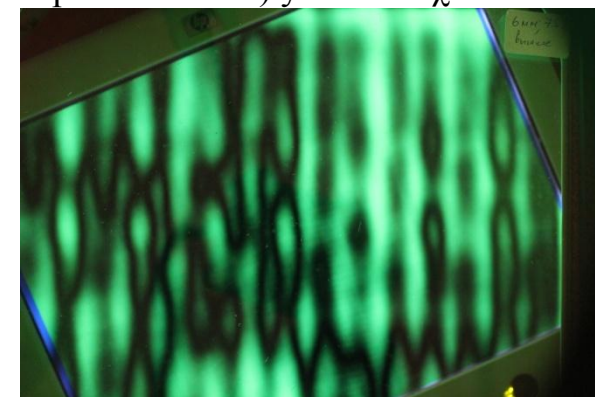


Рис. 2. Регистрируемое распределение интенсивности света, прошедшего через контролируемое автомобильное стекло

В этом случае имеем:

$$I(x, y) = I_{\perp}^{(1)} = I_p T_1 \sin^2 2\alpha \cdot \sin^2 \frac{\delta}{2}, \quad (2)$$

где $T_1 = T(\alpha, \chi = 90^\circ)$.

Затем размещаем анализатор 4 так, что $\chi = 0^\circ$, и получаем

$$I(x, y) = I_{\parallel}^{(1)} = I_p T_1 (1 - \sin^2 2\alpha \cdot \sin^2 \frac{\delta}{2}). \quad (3)$$

Измеренные распределения интенсивности позволяют определить произведение функций

$$\sin^2 2\alpha \cdot \sin^2 (0.5k\delta) = I_{\perp}^{(1)} / (I_{\perp}^{(1)} + I_{\parallel}^{(1)}). \quad (4)$$

Далее поворачиваем поляризатор 2 на угол, равный 45° (т.е. имеем $\alpha + 45^\circ$), а анализатор располагаем под углом $\chi = 90^\circ$, при этом интенсивность определяется как:

$$I(x, y) = I_{\perp}^{(2)} = I_p T_2 \cos^2 2\alpha \cdot \sin^2 \frac{\delta}{2}, \quad (5)$$

где $T_2 = T(\alpha + 45^\circ, \chi = 90^\circ)$.

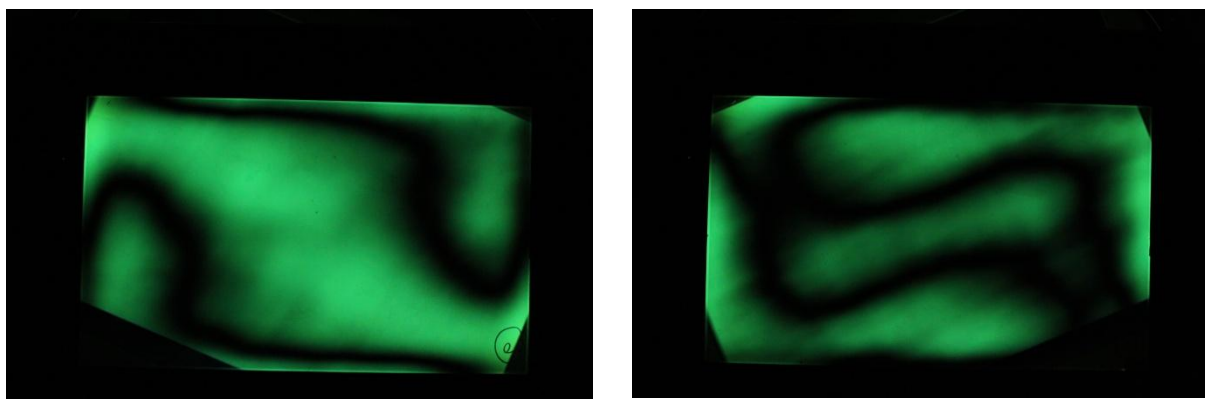


Рис. 3. Распределение интенсивности прошедшего света $I_{\perp}^{(1)}$ и $I_{\perp}^{(2)}$ для двух ориентаций системы «поляризатор – анализатор» относительно образца

На последнем этапе измерение распределения интенсивности осуществляем при ориентации поляризатора относительно исследуемого образца под углами $\alpha + 45^\circ$ и $\chi = 0^\circ$, тогда

$$I(x, y) = I_{\parallel}^{(2)} = I_p T_2 (1 - \cos^2 2\alpha \cdot \sin^2 \frac{\delta}{2}). \quad (6)$$

Обработка этих измерений позволяет определить величину произведения

$$\cos^2 2\alpha \cdot \sin^2 (0.5k\delta) = I_{\perp}^{(2)} / (I_{\perp}^{(2)} + I_{\parallel}^{(2)}). \quad (7)$$

Следует также отметить, что предлагаемый подход позволяет избежать от недостатка, имеющего место в поляриметрии – изоклин, который искажает картину визуализации напряжений и не может быть исключен для широкоформатных стекол с помощью специальных компенсаторов. Фактически в каждой точке образца вычисляют суммарную интенсивность

$I(x, y) = I_{\perp}^{(1)} + I_{\perp}^{(2)} = I_p T \sin^2 \frac{\delta(x, y)}{2}$, которая не зависит от распределения $\alpha(x, y)$:

$$I(x, y) / (I_p T) = \frac{I_{\perp}^{(1)}}{I_{\perp}^{(1)} + I_{\parallel}^{(1)}} + \frac{I_{\perp}^{(2)}}{I_{\perp}^{(2)} + I_{\parallel}^{(2)}}. \quad (8)$$

В этом выражении отсутствует множитель $\sin^2 2\alpha$, ответственный за изоклины, поэтому в построенной картине $I(x, y)$ в соответствии с (8), не будет темных участков, обусловленных условием $\alpha = 0$.

Распределение разности фаз $\delta(x, y)$ можно получить, обработав картины распределений интенсивности и учитывая (4 и 7), получаем для разности фаз в каждой точке стекла

$$\delta = 2 \left\{ \arcsin \left(\pm \sqrt{\frac{I_{\perp}^{(1)}}{I_{\perp}^{(1)} + I_{\parallel}^{(1)}} + \frac{I_{\perp}^{(2)}}{I_{\perp}^{(2)} + I_{\parallel}^{(2)}}} \right) + m\pi \right\}, \quad m \in \mathbb{Z}. \quad (9)$$

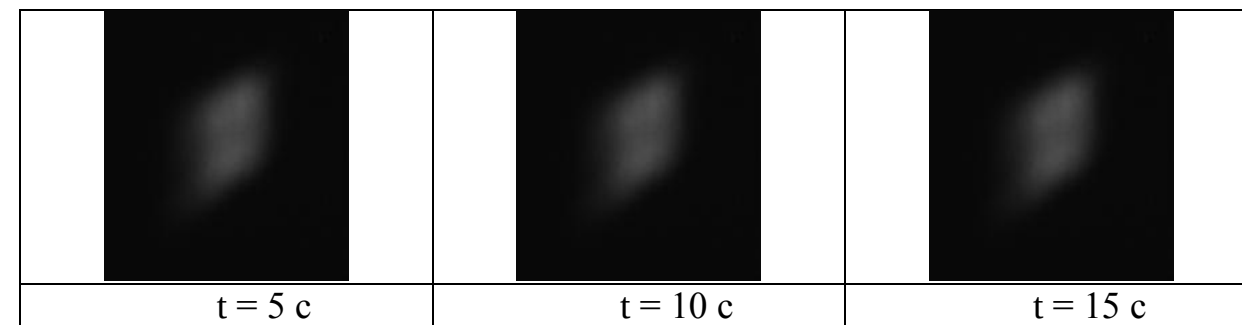


Рис. 3. Изображения фокусного пятна рентгеновской трубки, полученное с использованием преломляющей рентгеновской линзы при различных экспозициях

В исследованиях рентгеновская линза располагалась вместо пинхол камеры (см. рис. 1) на удвоенном фокусном расстоянии ($a = 2f = 184$ мм) от фокусного пятна рентгеновской трубки, а рентгеновская камера - на удвоенном фокусном расстоянии от линзы ($b = 2f = 184$ мм). В соответствии с формулой линзы для данной геометрии формирования пучка можно ожидать, что в плоскости изображения будет наблюдаться изображение фокусного пятна рентгеновской трубки в пропорции 1:1.

На рис. 3 приведено изображение фокусного пятна рентгеновской трубки БСВ-17, полученное с использованием преломляющей рентгеновской линзы при различных экспозициях. Проведенный анализ изображений показал, что их размер и форма достаточно хорошо совпадают с аналогичными изображениями, полученными с использованием пинхол камеры. Увеличение экспозиции объясняется ослаблением рентгеновского излучения в материале линзы.

Таким образом, исследования показали перспективность использования пинхол камеры и преломляющей рентгеновской линзы для определения размеров источников рентгеновского излучения.

Работа выполнена в рамках задания 4.43 подпрограммы «Техническая диагностика» ГПНИ «Механика, техническая диагностика, металлургия».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дудчик, Ю. И. Многоэлементная сферическая преломляющая линза для формирования микро- и наноразмерных пучков рентгеновского излучения / Ю. И. Дудчик // Вест. Белорус. гос. ун-та. Сер. 1. Физика. Математика. Информатика. – 2008. – № 2. – С. 26–30.
2. Дудчик, Ю. И. Получение изображения источников рентгеновского излучения с использованием пинхол камеры / Ю. И. Дудчик, И. Ю. Звягин // Приборостроение-2013: материалы 6-ой Междунар. науч.-техн. конф. – Минск : БНТУ, 2013. – С. 290–292.

E-mail: dudchik@bsu.by



Рис. 1. Установка для определения размеров фокусного пятна рентгеновской трубки

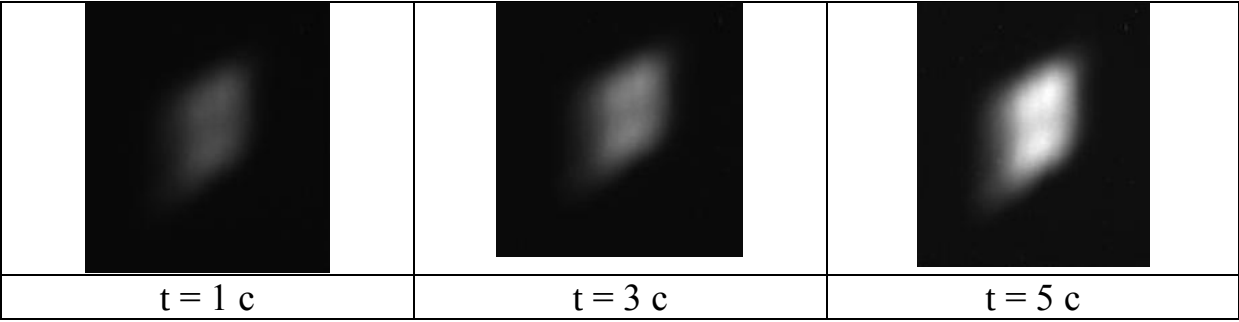


Рис. 2. Изображения фокусного пятна рентгеновской трубки, полученное с использованием пинхол камеры при различных экспозициях

Полученные изображения обрабатывались в программе Image Pro Express. В результате расчетов установлено, что размер источника излучения (эффективное фокусное пятно рентгеновской трубки) составляет 0,53x0,75 мм, что близко к паспортному значению.

Дополнительно для получения изображения фокусного пятна рентгеновской трубки использовалась многоэлементная преломляющая рентгеновская линза, содержащая 72 двояковогнутых эпоксидных микролинз с радиусом кривизны 50 мкм каждая. Фокусное расстояние рентгеновской линзы для фотонов с энергией 8 кэВ составляет 92 мм. Преломляющая рентгеновская линза является изображающим устройством. Если источник излучения имеет размер S и расположен на расстоянии a от линзы, то положение изображения источника относительно линзы и его размер S_1 находятся из следующих соотношений:

$$1/a + 1/b = 1/f, S_1 = S(f/(a-f)),$$

где b – расстояние от линзы до плоскости изображения, f – фокусное расстояние рентгеновской линзы.

Можно показать, что разность фаз

$$\delta(x, y) = (kC / \cos 2\alpha) \int_{-d/2}^{d/2} (\sigma_X(x, y, z) - \sigma_Y(x, y, z)) dz, \quad (10)$$

где σ_X и σ_Y – напряжения нормальные плоскостям OYZ и OXZ соответственно, C – относительный оптический коэффициент напряжения, d – толщина стекла.

Учитывая взаимосвязь фазы волны с напряжениями, можно воспроизвести поле механических напряжений.

Эффективность заявляемого способа демонстрируют приведенные на рис. 4 результаты, полученные при анализе полей напряжений в плоскости протяженного объекта на основе анализа распределения (9).

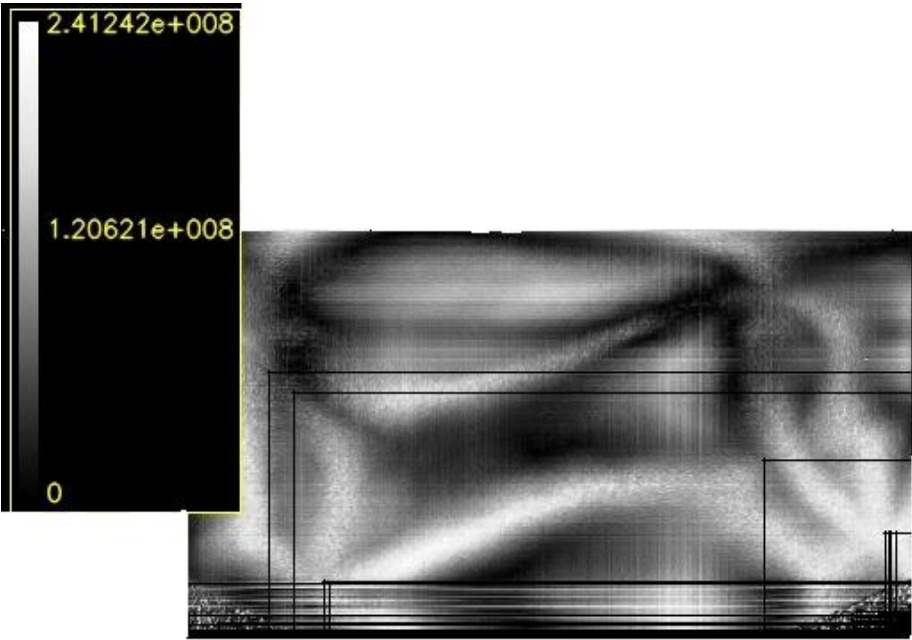


Рис. 4. Распределение величины механических напряжений в плоскости анизотропного объекта (шкала градаций приведена в Па)

Используя предложенный подход, выполнены измерения оптической анизотропии в закаленных стеклах различной толщины, изготовленных при различных технологических режимах. Показана возможность контроля распределения величины механических напряжений вдоль поверхности закаленных стекол по результатам обработки их изображения в поляризованном свете.

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА С ИНДИКАТОРНЫМ ТЕНЗОПОКРЫТИЕМ НА ОСНОВЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Д. В. ЧЕРНОВ, В. А. БАРАТ, *С. В. ЕЛИЗАРОВ
ФГБОУ ВПО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»
*ООО «ИНТЕРЮНИС»
Москва, Россия

В настоящее время основные детали летательных аппаратов изготавливают из композиционных материалов. Композиционные материалы обладают высокими прочностными характеристиками, низкой плотностью и технологичностью при изготовлении конструкций сложной аэродинамической формы. Для оперативного наблюдения за состоянием авиационных композитных материалов применяют индикаторные тензопокрывтия.

Индикаторные тензопокрывтия позволяют выявлять зоны с высоким уровнем напряжений. Тензопокрывтие представляет собой анодированную алюминиевую фольгу с толщиной оксидной пленки 10–40 мкм, наклеенную на исследуемый элемент конструкции. Разработка тензопокрывтий осуществляется таким образом, чтобы предел прочности покрытия не превышал предела упругости основного материала. При превышении допустимого уровня механических напряжений тензопокрывтие начинает разрушаться задолго до начала разрушения основного композитного материала.

Для автоматизации процесса слежения за состоянием тензопокрывтия и основного композиционного материала используется акустико-эмиссионный (АЭ) мониторинг. Использование АЭ мониторинга позволяет оперативно следить за состоянием объекта, определять местоположение дефектов, а также на основании АЭ параметров различать сигналы от разрушения тензопокрывтия и от основного композитного материала.

В данной работе описана методика, позволяющая оценивать состояние многослойного материала, состоящего из композитного основания, на которое наносится хрупкая оксидная пленка. Методика основана на аппроксимации зависимости суммарного счета АЭ аналитической микромеханической моделью акустической эмиссии (ММАЭ). Изменение параметров модели с течением времени позволяет судить о процессе разрушения многослойного гетерогенного материала.

При разработке методики проводились экспериментальные исследования - испытания образцов на разрыв. При испытаниях использовалась установка INOV АИК-6033, АЭ мониторинг проводился при помощи системы A-Line 32D компании «ИНТЕРЮНИС».

ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕЛОМЛЯЮЩЕЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ЛИНЗЫ И ПИНХОЛ КАМЕРЫ

Ю. И. ДУДЧИК
НИУ «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНЫХ
ФИЗИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ им. А. Н. Севченко» БГУ
Минск, Беларусь

Источники рентгеновских лучей характеризуются целым рядом параметров, один из которых – размер. Так размер фокусного пятна анода рентгеновской трубки может меняться со временем, поэтому его нужно контролировать, что важно с практической точки зрения.

Получить изображение источника рентгеновского излучения можно с использованием многоэлементной преломляющей рентгеновской линзы [1], а также с использованием пинхол камеры [2].

В данном сообщении для получения изображения источника рентгеновского излучения в качестве оптического элемента была использована пинхол камера (камера-обскура) и многоэлементная преломляющая рентгеновская линза. Изображение источника излучения визуализировалось с использованием цифровой рентгеновской камеры.

Объектом исследования является фокальное пятно рентгеновской трубки БСВ-17 с медным анодом. Паспортное значение фокального пятна трубки БСВ-17 равно $0,6 \times 8 \text{ мм}^2$. Угол между зеркалом анода и рабочим пучком составлял 6° , поэтому эффективное фокусное пятно трубки (проекция реального пятна на направление пучка) имеет размер $0,6 \times 0,84 \text{ мм}^2$.

Для получения изображения фокального пятна была создана установка, показанная на рис. 1, где 1 – рентгеновская трубка в кожухе, 2 – пинхол камера; 3 – цифровая рентгеновская камера.

В качестве изображающего использовались свинцовая пинхол камера с отверстием размером в 100 мкм и многоэлементная преломляющая рентгеновская линза с фокусным расстоянием 92 мм для 8-кэВ фотонов.

В качестве рентгеновской камеры для регистрации изображения источника излучения использовалась ПЗС камера фирмы Photonic Science (модель FDI VHR) со сцинтиллятором, нанесенным на волоконно-оптическую шайбу.

С помощью пинхол камеры были получены изображения фокусного пятна рентгеновской трубки при различных значениях следующих параметров: а – расстояние от источника до пинхол камеры, б – расстояние от пинхол камеры до рентгеновской камеры, t – экспозиции.

На рис. 2 показаны изображения источника излучения при $a = 170 \text{ мм}$, $b = 170 \text{ мм}$ и различных экспозициях t: 1 с, 3 с, 5 с.

алов, на пленках с различными участками шероховатости было подтверждено, что погрешность от шероховатости никелевого покрытия близка к нулю.

Отсюда следует принципиальное отличие характера влияния шероховатости немагнитных покрытий на точность измерения толщины от влияния шероховатости на ферромагнитных никелевых покрытиях. При измерении толщины немагнитных покрытий на немагнитной основе шероховатость обуславливает как систематическую, так и случайную погрешность. При измерении толщины никелевых покрытий отрывная сила магнита определяются только эффективным объемом покрытия, находящимся под магнитом и толщиной покрытия, аналогично показанной на рис. 1. Поясняется это тем, что магнитное поле постоянного магнита, изготовленного, например, из редкоземельных материалов, воздействующее на покрытие, на расстоянии до 200–300 мкм практически по величине однородно и неизменно. Если использовать постоянные магниты с полусферическим наконечником, диаметр полусферы которого более 4 мм, то градиент магнитного поля будет минимален. В этом случае можно наблюдать независимость показаний толщиномера от толщины немагнитной прокладки, помещаемой между постоянным магнитом и никелевым покрытием, если толщина прокладки не превышает указанных 200–300 мкм. Косвенное подтверждение выше сказанному может служить наблюдаемая прямо пропорциональная зависимость отрывной силы от толщины никелевого покрытия во всем диапазоне измеряемых толщин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудницкий, В. А. Особенности измерений тощины никелевых покрытий магнитным методом / В. А. Рудницкий, В. А. Антипенко // Докл. АН БССР. – 1977. – № 3. – Т. XXI.

E-mail: gnutenkoev@gmail.com
rudnitsky@iaph.bas-net.by

Для определения состояния основного материала была исследована и применена микромеханическая модель акустической эмиссии (ММАЭ), основанная на кинетической концепции прочности С.Н. Журкова. Модель связывает суммарный счет АЭ – $N_{\Sigma}(t)$ и концентрацию микротрещин $C(t)$, которые в соответствии с теорией Журкова, представляют собой разрушенные структурные элементы (1)

$$N_{\Sigma}(t) = k_{AE}C(t), \quad (1)$$

где k_{AE} – акустико-эмиссионный коэффициент пропорциональный объему деформации.

$$N_{\Sigma}(t) = k_{AE} \cdot C_0 \int_q^{q1(\varepsilon(t))} \Psi_{\gamma}(\gamma, \varepsilon(t)) \left(1 - \exp \left(- \int_0^t \frac{d\bar{t}}{\tau_0 \exp \left(\frac{U_0 - \gamma \sigma(\bar{t})}{RT} \right)} \right) \right) d\gamma. \quad (2)$$

ММАЭ задается выражением (2), где $\Psi_{\gamma}(\gamma, \varepsilon(t))$ – распределение структурно-чувствительного параметра γ ; $q1(\varepsilon(t))$ – предельное значение $\Psi_{\gamma}(\gamma, \varepsilon(t))$; R – газовая постоянная; T – температура; $\sigma(\bar{t})$ – напряжение, приложенное к объекту.

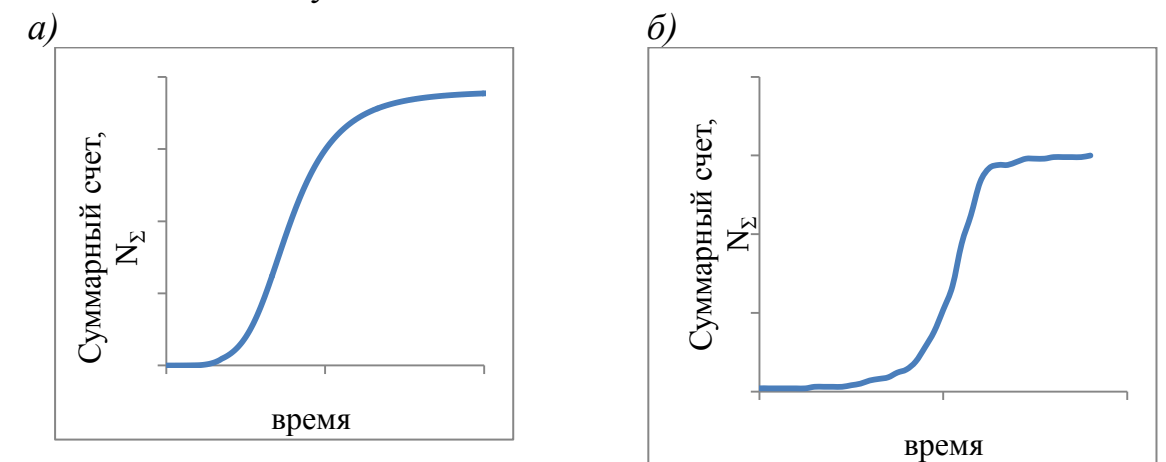


Рис. 1. Суммарный счет акустической эмиссии, полученный при помощи ММАЭ (а), в экспериментах по разрушению композиционного материала (б)

На рис. 1 показан суммарный счет АЭ, полученный теоретически, при помощи ММАЭ и экспериментально, при разрыве композитного образца. Идентичный вид зависимостей доказывает состоятельность исследуемой модели.

При переходе определенного уровня приложенной нагрузки, в соответствии с ММАЭ, происходит активация процесса разрушения структурных элементов. Вначале разрушаются элементы с большим значением структурно-чувствительного параметра γ . Оценкой текущего состояния объекта контроля может быть предельное значение структурно-чувствительного параметра $q1$ [3].

На рис. 2 показана зависимость величины $q1$ от времени при разрушении многослойного образца. Начальный участок зависимости, на котором значение $q1$ остается неизменным, соответствует разрушению тензопокртия, уменьшение значения $q1$ свидетельствует об ограничении распределения параметра γ и разрушении основного композитного материала образца.

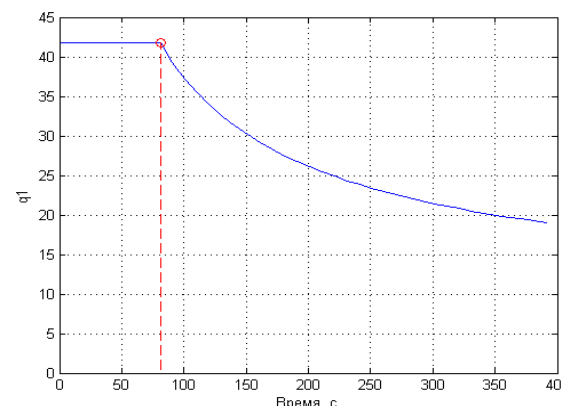


Рис. 2. Определение начала пластической деформации с помощью ММАЭ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплексная диагностика процессов деформирования и разрушения элементов конструкций с использованием хрупких тензопокртий и акустической эмиссии / С. В. Елизаров [и др.] // XX Всероссийская научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике: тез. докл. Москва, 3–6 марта 2014 г. – М. : Издательский дом «Спектр», 2014. – С. 397–399.
2. Носов, В. В. Диагностика машин и оборудования: учеб. пособие / В. В. Носов. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб. : Издательство «Лань», 2012. – 384 с.
3. Лахова, Е. Н. Методика прогнозирования работоспособности критически нагруженных объектов машиностроения: дис. ... канд. техн. наук : 05.02.02 : защищена 20.11.12. – СПб., 2012. – 165 с.

E-mail: chernovdv@inbox.ru
vera.barat@mail.ru
serg@interunis.ru

где I – нормальная составляющая намагниченности никелевого слоя; R_1 и R_2 – расстояния от полюса магнита до рассматриваемого элемента площадки dS .

Для $R_1 \gg h$ значения R_1 и R_2 связаны следующим соотношением:

$$R_2 = R_1 + h \cdot \cos \alpha = R_1 + h \frac{a}{R_1}, \quad (2)$$

где a – полюсное расстояние; α – угол между R_1 и нормалью к поверхности.

Шероховатость поверхности покрытия будем моделировать гармонически меняющейся функцией с амплитудой равной параметру шероховатости Rz :

$$h = h_0 + Rz \cdot \sin \frac{2\pi \rho}{l}, \quad (3)$$

где h_0 – средняя толщина покрытия или расстояние между средними линиями профилей наружной и внутренней стороны покрытия; l – длина волны шероховатости, ρ – расстояние от оси магнита до рассматриваемой площадки.

Выражение (1) с учетом уравнений (2) и (3) можно записать в виде:

$$U = I \cdot a \int_S \frac{h_0 + Rz \cdot \sin \frac{2\pi \rho}{l}}{R_1} dS. \quad (4)$$

После операций интегрирования и последующего дифференцирования по a получаем выражение для силы притяжения магнита:

$$F = \frac{K}{4a^3} \left\{ h_0 + Rz \cdot \frac{\pi^2}{2} e^{\frac{-2\pi a}{l}} \frac{a^3}{l^3} \cdot \left(2\pi^2 + \frac{\pi l}{a} + \frac{l^2}{2a^2} \right) \right\}. \quad (5)$$

Первое слагаемое в круглых скобках с учетом множителя $K/4a^3$, являющегося функцией намагниченности и полюсного расстояния магнита, дает значение для отрывной силы магнита при отсутствии шероховатости ($Rz = 0$).

Из формулы (5) следует важный вывод о наличии прямо пропорциональной зависимости между отрывной силой и толщиной никелевого покрытия.

Второе слагаемое в формуле (5) показывает вклад в отрывную силу шероховатости никелевого покрытия:

$$F = F_0 + \Delta F. \quad (6)$$

Взяв отношение $\Delta F/F_0$, получим относительную погрешность измерения отрывной силы, обусловленную шероховатостью:

$$\delta = \frac{Rz}{h_0} \cdot \frac{\pi^2}{4} (4\pi^2 \gamma^3 + 2\pi \gamma^2 + \gamma), \quad (7)$$

где $\gamma = a/l$.

Принимая, что Rz не превышает $0,5h_0$, а для постоянных магнитов, используемых в толщиномерах, всегда выполняется условие $a/l > 4$, то погрешность не превысит доли процента.

При измерениях приборами МТА-НЦ, разработанными в ИПФ НАН Беларуси, использующих постоянные магниты из редкоземельных матери-

ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ НА РЕЗУЛЬТАТ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫМ ПОНДЕРОМОТОРНЫМ МЕТОДОМ ТОЛЩИНЫ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ

Е. В. ГНУТЕНКО, В. А. РУДНИЦКИЙ

ГНУ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»

Минск, Беларусь

В отличие от толщины немагнитных покрытий, где измеряемая толщина является зазором между взаимодействующими объектами, одним из которых является постоянный магнит, а другим – ферромагнитное основание, никелевое покрытие, представляет объект, непосредственно взаимодействующий с постоянным магнитом. Это взаимодействие можно описать с помощью двойного магнитного слоя, представляющего никелевое покрытие. На рис. 1 представлена схема контакта постоянного магнита с полюсным расстоянием a с никелевым покрытием толщиной h . Поле постоянного магнита индуцирует на внешней и внутренней поверхностях никелевого покрытия одинаковые по величине, но разные по знаку поверхностные магнитные заряды, поле которых взаимодействует с полем постоянного магнита в виде силы притяжения и отталкивания соответственно.

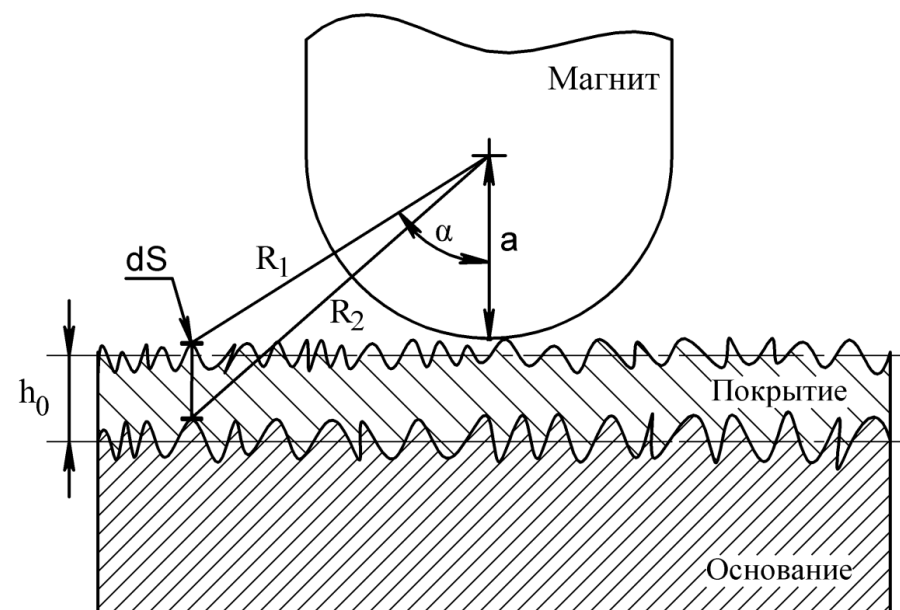


Рис. 1. Схема взаимодействия постоянного магнита с никелевым покрытием с шероховатой поверхностью

Выражение для скалярного потенциала магнитного поля в месте расположения полюса постоянного магнита будет следующим [1]:

$$U = \int_S \frac{IdS}{R_1} - \int_S \frac{IdS}{R_2} = I \int_S \frac{R_2 - R_1}{R_1 R_2} dS, \quad (1)$$

МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ СОДЕРЖАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОЙ ФАЗЫ В НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЯХ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА

А. К. ШУКЕВИЧ, В. И. ШАРАНДО, *К. И. ЯНУШКЕВИЧ

ГНУ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»,

*ГО «НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР НАН Беларуси

ПО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЮ»

Минск, Беларусь

В настоящее время в атомной энергетике, а также в ряде отраслей машиностроения находят широкое применение высоколегированные нержавеющие стали аустенитного класса. После закалки от температур $1000 \div 1050^\circ \text{C}$ они имеют структуру аустенита и обладают высокими механическими характеристиками, коррозионной стойкостью. Однако последующая механическая, термическая обработка и облучение приводят к появлению ферромагнитной фазы и ухудшению указанных параметров. Поэтому о качестве как исходных материалов, так и готовых изделий судят по результатам измерения намагниченности насыщения. Существующий ГОСТ Р 53689-2009 (ИСО 8249:2000) предполагает, что возникающая ферромагнитная фаза является δ -ферритом, удельная намагниченность которого составляет $125 \text{ Ам}^2 \text{ кг}^{-1}$. Содержание этой фазы определяют по отношению намагниченностей насыщения исследуемой стали и δ -феррита: M_o^s / M_{δ}^s . Главной проблемой при этом является обеспечение необходимой чувствительности измерений.

В ИПФ НАН Беларуси разработан магнитодинамический метод измерения магнитных полей рассеяния [1], основанный на измерении потока индукции, созданного намагниченным участком объекта контроля и обладающий высокой чувствительностью в области слабых магнитных полей. В частности, в [2] показано, что он позволяет измерять толщину слабомагнитных металлокерамических покрытий ($\mu \leq 2$), нанесенных на диамагнитное основание.

В данной работе рассмотрена возможность применения магнитодинамического метода для контроля содержания ферромагнитной фазы в высоколегированных нержавеющих сталях аустенитного класса.

Исследовалась сталь 12X18H9T. Элементный состав, по данным рентгенофлуоресцентного анализа, приведен в табл. 1.

Табл. 1. Элементный состав образцов

C, %	S, %	Cr, %	Ni, %	Mn, %	Si, %	Mo, %	Ti, %	основа
0,12	0,011	18,2	9,2	1,3	0,6	0,25	0,4	Fe

Из листа толщиной 8 мм были изготовлены образцы в виде кубиков размером 4×4×4 мм. Измерения намагниченности проводились на каждой из граней преобразователем магнитодинамического прибора, а также в трёх взаимно перпендикулярных направлениях на метрологически аттестованном магнетометре пондеромоторного принципа действия в поле 8,6 кЭ. При этом нормали к граням 1-1* и 2-2* лежат в плоскости прокатки, нормали к граням 3-3* – перпендикулярны ей. Результаты приведены в табл. 2.

Табл. 2. Анизотропия магнитных свойств

№ образца	Магнитодинамический сигнал на заданной грани, отн. ед.			Данные магнетометра, Ам ² кг ⁻¹		
	1-1*	2-2*	3-3*	1-1*	2-2*	3-3*
1	130	99	29	2,066	2,068	2,099
2	133	100	30	2,029	2,032	2,042
3	127	99	30	1,980	2,007	2,048
4	135	106	36	2,014	2,044	2,075
5	133	102	35	1,997	2,002	2,022
среднее	131,6	101,2	32,0	2,0172	2,0306	2,0572

Как следует из табл. 1, все образцы обладают магнитной анизотропией. Однако проявляется она по-разному при различных способах измерения. Объяснение этого факта получено в виртуальных экспериментах компьютерным моделированием. Обычно считают, что ферромагнитная фаза представляет собой мелкие области (кластеры), которые объединяясь, образуют цепочки, металлографически проявляющиеся в виде отдельных линий. В данном случае компьютерная модель состояла из неферромагнитной матрицы размером 4×4×4 мм, в которой размещалось параллельно друг другу 100 ферромагнитных стержней длиной 4 мм, диаметр которых определялся задаваемым объемом ферромагнитной фазы. С использованием метода конечных элементов и программы COMSOL 3.5 рассчитан информативный сигнал магнитодинамического преобразователя и поток индукции в магнетометре через грань, перпендикулярную направлению поля, для случаев, когда оси ферромагнитных стержней параллельны полю магнетометра и оси преобразователя, либо перпендикулярны им. В первом случае получено для магнетометра $1,446 \times 10^{-5}$ Вб, для преобразователя – $2,67 \times 10^{-7}$ Вб; во втором случае, соответственно, – $1,373 \times 10^{-5}$ Вб и $5,19 \times 10^{-7}$ Вб. Таким образом, приведенные в табл. 2 результаты обусловлены разным характером намагничивающего поля в магнетометре (существует только одна составляющая) и преобразователе (существуют две составляющие H_R и H_z). Приведенные в табл. 2 результаты позволяют определить чувствительность преобразователя к намагниченности. Эта величина составляет $3,3 \times 10^{-4}$ Ам²кг⁻¹.

В последнее время выяснилось, что в аустенитных сталях возможно появление и других ферромагнитных фаз [3], в частности мартенсита, маг-

нитные параметры которого отличаются от δ -феррита. Это потребовало, для исключения ошибок при контроле, определения природы ферромагнитной фазы. Для этого необходимо определить температуру Кюри. Такие измерения выполнены на упомянутом магнетометре для всех образцов; типичный результат показан на рис. 1. Для всех образцов температура Кюри лежит в интервале 835÷850 К, что соответствует NiFe. Наличие данной фазы подтверждено также данными рентгеноструктурного анализа и дифракцией обратнорассеянных электронов. Так как M_{NiFe}^s составляет 140 Ам²кг⁻¹, то с учетом $M_o^s(300^\circ K)=1,8 \text{ Ам}^2 \text{ кг}^{-1}$ получаем чувствительность магнитодинамического метода к объемному содержанию ферромагнитной фазы порядка 0,012 %.

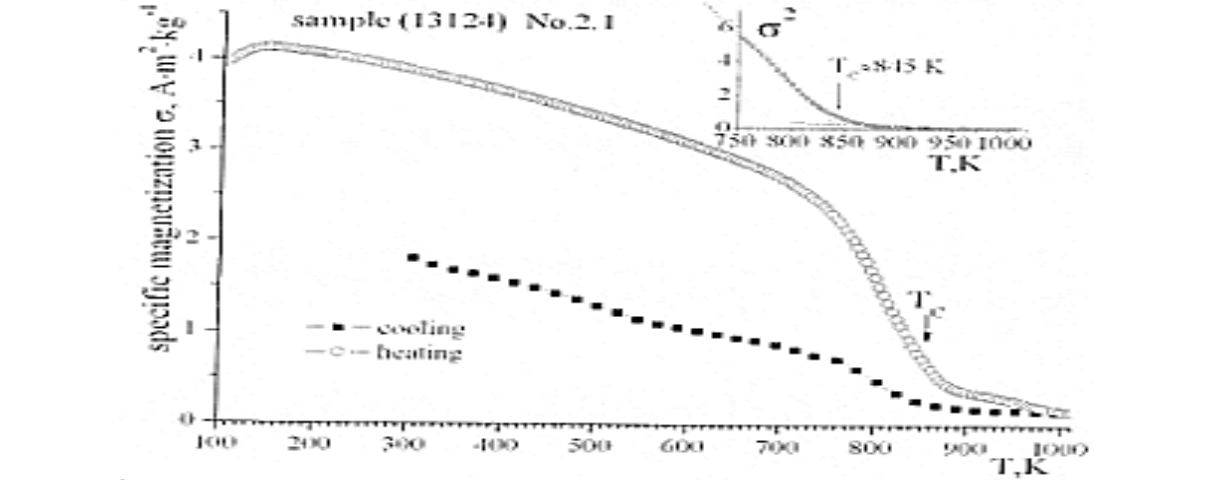


Рис. 1. Зависимость удельной намагниченности образца от температуры при его нагревании и охлаждении со скоростью 2 град/сек. Определение температуры Кюри

Таким образом, проведенные исследования показали возможность применения магнитодинамического метода для измерения содержания ферромагнитной фазы с высокой разрешающей способностью

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лухвич, А. А. Магнитные толщинометры нового поколения / А. А. Лухвич // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2010. – № 4 – С. 3–15.
2 Магнитный метод контроля толщины слабомагнитных двухсторонних покрытий по немагнитному основанию / А. А. Лухвич [и др.] // Дефектоскопия. – 2009. – № 7. – С. 75–82.
3. Снежной, Г. В. Идентификация низких содержаний феррита и мартенсита в аустенитных хромоникелевых сталях / Г. В. Снежной // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 7. – С. 76–79.

E-mail: lab1@iaph.bas-net.by