



РОССИЙСКОЕ ОБЩЕСТВО ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ
КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

**XX ВСЕРОССИЙСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ
И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ**

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Москва
3 – 6 марта 2014 г.



Москва, 2014

УДК [681.518.54+620.19](035)
ББК 30.82-5я2
Д25

Д25 **XX Всероссийская** научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике: тезисы докладов. Москва, 3 – 6 марта 2014 г. – М.: Издательский дом «Спектр», 2014. – 512 с.: ил.
ISBN 978-5-4442-0063-6
DOI 10.14489/4442-0063-6

Сборник содержит тезисы научных докладов, представленных на XX Всероссийской научно-технической конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике. Изложены результаты работ более 200 российских и зарубежных фирм – мировых лидеров по производству средств неразрушающего контроля и технической диагностики. В состав сборника вошли работы в области техногенной диагностики, антитеррористической диагностики, экологической диагностики, технического регулирования и определения остаточного ресурса.

УДК[681.518.54+620.19](035)
ББК 30.82-5я2

ISBN 978-5-4442-0063-6

© РОНКТД, 2014

**XX ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ
КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ**

Председатель оргкомитета:

Академик РАН, профессор Ключев В.В.

Члены оргкомитета:

Горкунов Э.С., Мигун Н.П., Щербинин В.Е., Ефимов А.Г.,
Шевалдыкин В.Г., Бобров В.Т., Артемьев Б.В., Кузелев Н.Р.,
Матвеев В.И., Шелихов Г.С., Сажин С.Г., Кольцов В.Н.,
Махутов Н.А, Ковалев А.В., Буклей А.А., Усачев Е.Ю.,
Кольцов В.Н., Копытов С.Г., Коновалов Н.Н., Муравская Н.П.;
Самокрутов А.А.

XX Russian Scientific Conference on Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics

Abstracts

Moscow, 3 – 6 March 2014

The book contains abstracts of scientific papers presented at the 20th Russian Scientific and Technical Conference on Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics. There are more than 200 papers of Russian and foreign companies – leading manufacturers of non-destructive testing and technical diagnostics devices and systems. The abstract book includes papers in the field of technological diagnostics, anti-terrorism diagnostics, environmental diagnostics, technical regulation and determination of residual life.

СОДЕРЖАНИЕ

Пленарное заседание

Клюев В.В. ЗАО «НИИИИИ МНПО «Спектр» – 50	27
Горкунов Э.С. РАЗЛИЧНЫЕ СОСТОЯНИЯ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ И ИХ УСТОЙЧИВОСТЬ К ВНЕШНИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ	28
Вавилов В.П. ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ: ВОЗРОЖДЕНИЕ ИНТЕРЕСА И ВОЗМОЖНОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ	29

Секция 1. Магнитные методы НК и ТД

Руководители секции: Бакунов А.С., Горкунов Э.С.

Бакунов А.С., Кудрявцев Д.А., Рогова В.С. СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ ИЗМЕРЕНИЯ СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ	31
Безлюдько Г.Я., Попов Б.Е., Соломаха Р.Н. ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОГО И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ, ВКЛЮЧАЯ ПРОГНОЗ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПО ИЗМЕРЕНИЯМ МАГНИТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ – КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ	32
Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Кузеванов В.Ф. МАГНИТНЫЙ МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ ЗОН ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ	33
Дубов Ал.Ан. ОПЫТ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТРОЙНИКОВ, ОТВОДОВ, АРМАТУРЫ НА НЕФТЕПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ СТАНЦИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ МЕТАЛЛА	35
Дубов А.А. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ЗОН КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ИЗДЕЛИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ – НЕДОСТАЮЩЕЕ ЗВЕНО В СИСТЕМЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ	36

Коваленко А.Н. ВНУТРИТРУБНАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ ТРУБОПРОВОДОВ С ГЛАДКОСТНЫМ ПОКРЫТИЕМ	37
Мушников А.Н., Задворкин С.М., Смирнов С.В., Якушенко Е.И. ВЛИЯНИЯ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ РАСТЯЖЕНИЕМ (СЖАТИЕМ), КРУЧЕНИЕМ И ГИДРОСТАТИЧЕСКИМ ДАВЛЕНИЕМ НА МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРУБНОЙ СТАЛИ	37
Ничипурук А.П., Огнева М.С., Сташков А.Н. ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ НА ПРОЦЕССЫ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ В ПРИСУТСТВИИ ДВУХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ОДНОРОДНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ	38
Путилова Е.А., Задворкин С.М. ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ	41
Ригмант М.Б., Степанова Н.Н., Виноградова Н.И., Казанцева Н.В. ЛОКАЛЬНЫЙ МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССОВ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В МАТЕРИАЛАХ ОТВЕТСТВЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ НИКЕЛЕВЫХ СУПЕРСПЛАВОВ ПРИ УПРУГО ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ	42
Сандомирский С.Г. АНАЛИЗ ДИАПАЗОНА ВОЗМОЖНОГО ИЗМЕНЕНИЯ РЕЛАКСАЦИОННОЙ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ СТАЛИ И ОЦЕНКА ЕЕ ВЕРОЯТНОГО ЗНАЧЕНИЯ	43
Сандомирский С.Г. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ МАГНИТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ СТАЛЕЙ В МАГНИТНОМ СТРУКТУРНОМ АНАЛИЗЕ И КОНТРОЛЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ	47
Сандомирский С.Г. АНАЛИЗ НАМАГНИЧИВАНИЯ ЧУГУНОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ ВНУТРЕННЕГО КОЭФФИЦИЕНТА РАЗМАГНИЧИВАНИЯ ГРАФИТОВЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ	50
Слесарев Д.А., Шпаков И.И. МОНИТОРИНГ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ ПОДЪЕМНЫХ МАШИН: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ	53
Субачев Ю.В., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М. О ВОЗМОЖНОСТЯХ МАГНИТНОЙ ДИАГНОСТИКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДВУХСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ С КОМПОНЕНТАМИ, ОБЛАДАЮЩИМИ МАГНИТОСТРИКЦИЕЙ РАЗНЫХ ЗНАКОВ	55
Филинов М.В. ЗАЩИТА ОБЪЕКТА ПРИ МАГНИТОПОРОШКОВОМ КОНТРОЛЕ	57

Шелихов Г.С., Глазков Ю.А. МАГНИТНАЯ ПРЕДЫСТОРИЯ И МАГНИТОПОРОШКОВЫЙ КОНТРОЛЬ ДЕТАЛЕЙ	58
Шелихов Г.С. ЯВЛЕНИЕ ВРАЩЕНИЯ ЧАСТИЦ СУСПЕНЗИИ ПРИ МАГНИТОПОРОШКОВОМ КОНТРОЛЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТАМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	59
Шелихов Г.С., Путников Ю.Г. НОВЫЕ ПРИБОРЫ МАГНИТОПОРОШКОВОГО КОНТРОЛЯ ДЕТАЛЕЙ	60

Секция 2. Электромагнитные методы НК и ТД

Руководители секции: Ефимов А.Г., Шкатов П.Н.

Борисков Ю. ПРИМЕНЕНИЕ МАТРИЧНЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ КОМПАНИИ EDDYFI (КАНАДА) ДЛЯ КОНТРОЛЯ УЗЛОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ	63
Ефимов А.Г., Бакунов А.С., Шубочкин А.Е. СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОТОЧНОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛОПРОКАТА	63
Коннов А.В., Кузнецов А.М., Новиков В.А., Загидулин Т.Р. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ВИХРЕТОКОВЫЙ СКАНЕР-ДЕФЕКТОСКОП АСД «ВИХРЬ-1»	64
Лунин В.П., Жданов А.Г., Чегодаев В.В., Лаврентьев А.А., Ловчев В.Н., Гуцев Д.Ф., Жуков Р.Ю. АМПЛИТУДНЫЙ КРИТЕРИЙ ГЛУШЕНИЯ ПАРОГЕНЕРАТОРНЫХ ТРУБ АЭС С ВВЭР	67
Лунин В.П., Чегодаев В.В., Жданов А.Г., Столяров А.А., Ловчев В.Н., Гуцев Д.Ф., Жуков Р.Ю. КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБАХ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ АЭС	71
Опанасенко А.В. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ВИХРЕТОКОВОГО МЕТОДА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОМ КОНТРОЛЕ УЗЛОВ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ЗАРУБЕЖНОГО И ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА	73
Петренко Е.О., Арбузов Е.В. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НАКЛАДНЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ	74

Потапов А.И., Сясько В.А., Чертов Д.Н. ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ЛИНЕЙНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ УГЛЕПЛАСТИКОВ	77
Сясько В.А. ПОДАВЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕШАЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ВИХРЕТОКОВОЙ ТОЛЩИНОМЕТРИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ	78
Хвостов А.А., Покровский А.Д. КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ВИХРЕТОКОВОГО ДЕФЕКТΟΣКОПА	80
Шкатов П.Н., Мостяев И.В. ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ НЕМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ	83
Шкатов П.Н. ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ ПРОВОЛОКИ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА	84
Шкатов П.Н. ИЗМЕРЕНИЕ ГЛУБИНЫ НАКЛОННЫХ ТРЕЩИН И ТРЕЩИН НА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ЭЛЕКТРОПОТЕНЦИАЛЬНЫМ МЕТОДОМ	86
Шкатов П.Н., Мякушев К.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ВИХРЕТОКО-МАГНИТНОГО МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ	89

Секция 3. Акустические методы НК и ТД

Руководители секции: Шевалдыкин В.Г., Бобров В.Т., Самокрутов А.А.

Алехин С.Г., Бобров С.В. ОСОБЕННОСТИ ЭМА ВОЗБУЖДЕНИЯ И ПРИЕМА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ОБЪЕМНЫХ ВОЛН В ПОСТОЯННОМ И ИМПУЛЬСНОМ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ	91
Бадалян В.Г., Самарин П.Ф. РАСЧЕТ КРИВЫХ ВЕРОЯТНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ТРУБОПРОВОДОВ АЭС	92
Бадалян В.Г. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «СІVA»	95
Баев А.Р., Майоров А.Л., Гуделев В.Г., Коновалов Г.Е., Ропот П.И. ПОДПОВЕРХНОСТНЫЕ И ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОЛНЫ В ОБЪЕКТАХ С ПОВЕРХНОСТНЫМ УПРОЧНЕННЫМ СЛОЕМ	96

Баев А.Р., Кулак Г.В., Гуделев В.Г., Митьковец А.И., Матвеева А.Г. РАССЕЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ НЕСПЛОШНОСТЬЮ ВОЛН РЭ- ЛЕЯ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ИМПУЛЬСНО-ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ	100
Базулин А.Е., Самарин П.Ф., Тихонов Д.С. ОПЫТ АВТОМАТИ- ЗИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ КОМПОЗИТ- НЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА АЭС С ВВЭР-440	103
Базулин А.Е., Бенитес Х., Пронин В.В., Тихонов Д.С., Шнель О.О. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ПОЛУАВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СПЛОШ- НАЯ ТОЛЩИНОМЕТРИЯ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ	105
Базулин Е.Г. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКО- ВОЙ ДЕФЕКТОМЕТРИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ АНТЕННЫХ РЕШЕ- ТОК	109
Базулин Е.Г. СОПОСТАВЛЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИБОРОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ, ИС- ПОЛЬЗУЮЩИХ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ И ФАЗИРОВАННЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ	111
Бишко А.В., Самокрутов А.А., Соколов Н.Ю., Шевалдыкин В.Г. ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ОЦЕНКИ МАЛОРАЗМЕРНЫХ НЕСПЛОШНОСТЕЙ МЕТАЛЛА ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЭХО- ТОМОГРАФИИ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ ФОКУСИРОВКИ АПЕР- ТУРЫ	115
Бобренко В.М., Бобров В.Т., Гульшин А.В. УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ РАЗЪ- ЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ МЕЖРЕМОНТНОЙ ЭКСП- ЛУАТАЦИИ	115
Воронков И.В. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ЛИНЕЙ- НОГО НАКЛОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ФАЗИРОВАННОЙ РЕШЕТКОЙ	117
Жуков С.Н. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ БА- ЗИСНЫХ МЕТОДОВ СТРУКТУРНОГО МОНИТОРИНГА РАБО- ТОСПОСОБНОСТИ ОБЪЕКТОВ	118
Заец М.В., Самокрутов А.А., Алехин С.Г., Подольский А.В. ОСО- БЕННОСТИ ВОЛНОВОДНОГО ЭХО-МЕТОДА ПРИ ВНУТРИ- ТРУБНОМ КОНТРОЛЕ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ТРУБОПРО- ВОДОВ	120

Иншаков Д.В., Быков С.П., Кузнецов К.А. ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЗОНДИРОВАНИИ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБ	121
Козлов В.Н., Козлов А.В. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ КООРДИНАТ ДЕФЕКТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК В УЗ ДЕФЕКТОСКОПАХ	124
Муравьев В.В., Волкова Л.В., Балобанов Е.Н., Котоломов А.Ю. ОЦЕНКА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕСАХ И РЕЛЬСАХ МЕТОДОМ АКУСТОУПРУГОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ	126
Муравьева О.В., Стрижак В.А., Злобин Д.В., Соков М.Ю. ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД НА МНОГОКРАТНЫХ ОТРАЖЕНИЯХ ПРИ КОНТРОЛЕ ЛИНЕЙНО-ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ	129
Петров А.А. НОВЫЕ СТАНДАРТЫ ИСО В ОБЛАСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК	133
Соколов Н.Ю. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК	135
Суворов В.А. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ТЕЛА ТРУБ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ ПРИ ПОМОЩИ БЕСКОНТАКТНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО СКАНЕРА-ДЕФЕКТОСКОПА А2075 «SoNet»	136
Суханов Д.Я., Латипова Л.М. СОНАР ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ЗВУКОВИДЕНИЯ	137
Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Глоба С.Н., Ле Чи Хиеу, Познякова М.Е., Хомяк Ю.В., Десятниченко А.В. РАБОТЫ НТУ «ХПИ» В ОБЛАСТИ НК	140
Тарабрин В.Ф., Кузьмин Е.В., Горбунов О.Е., Зверев А.В. ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОРОГА УРОВНЯ СИГНАЛОВ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РАСШИФРОВКЕ ДЕФЕКТОГРАММ АПК «АСТРА»	145
Чуприн В.А. О СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЯХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТЕЙ	148

Чуприн В.А. ОСОБЕННОСТИ АКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ СДВИГОВОЙ ВЯЗКОСТИ И ПЛОТНОСТИ ЖИДКОСТЕЙ	151
Чуприн В.А., Застава А.П., Васильев В.А. К ВОПРОСУ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАКЛОННЫХ СОВМЕЩЕННЫХ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ЧАСТОТУ 10 МГЦ	154

Секция 4. Радиационные методы НК и ТД

Руководители секции: Артемьев Б.В., Кузелев Н.Р.

Артемьев Б.В., Артемьев И.Б., Созонтов А.Н. ДИСТАНЦИОННОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ СИСТЕМ РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ НА ПРОИЗВОДСТВЕ	157
Бабиков С.А., Батрагин А.В. РАДИОГРАФИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЦИФРОВЫХ МАТРИЧНЫХ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СТАЛЬНЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ	158
Батрагин А.В., Капранов Б.И., Чахлов С.В. РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ТОМОГРАФИЧЕСКИХ УСТАНОВОК	160
Бессонов В.Б., Потрахов Е.Н., Потрахов Н.Н. ИСТОЧНИК ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ С ФОТОКАТОДОМ	162
Бессонов В.Б., Герасимов В.А., Потрахов Е.Н., Селиванов Л.М., Архипов М.В., Великанов Л.П., Желудков А.В. ТЕХНОЛОГИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА КОНСЕРВИРОВАННОЙ ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ	166
Богомолов Е.Н., Сырякин В.И., Сунцов С.Б. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ	170
Буклей А.А., Блохин Е.О., Емельянов М.Е., Паршин И.А., Федоровский Е.В. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ МЕТОДОВ РЕГИСТРАЦИИ ОБРАТНО РАССЕЯННОГО И ТРАНСМИССИОННЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ПРИ КОНТРОЛЕ НИЗКОПЛОТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ РАЗЛИЧНОГО ПРИМЕНЕНИЯ	172
Владимиров Л.В., Козлов А.А. РЕНТГЕНОВСКАЯ ЭКСПОНОМЕТРИЯ В ДИАГНОСТИКЕ	173

Власов В.В., Коновалов А.Б., Углов А.С. ОСНОВАННЫЙ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ АЛГОРИТМ ДЛЯ СВОБОДНОЙ ОТ АРТЕФАКТОВ РЕКОНСТРУКЦИИ В МАЛОРАКУРСНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ	174
Горшков В.А. ИДЕНТИФИКАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО АТОМНОГО НОМЕРА НА ОСНОВЕ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ	178
Долгих А.В. ИМПУЛЬСНАЯ СПЕКТРОЗОНАЛЬНАЯ ЦИФРОВАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ ДИАГНОСТИКА ОДНОКРАТНЫХ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ	179
Золотарев С.А., Венгринович В.Л. РЕНТГЕНОВСКАЯ ТОМОГРАФИЯ ТРУБ ИЗ СУЩЕСТВЕННО НЕПОЛНЫХ ДАННЫХ	180
Кузелев Н.Р., Богод В.Б., Берлизов Е.В., Ковалев М.М. ТЕХНОЛОГИИ РАДИОИЗОТОПНОЙ РАДИОГРАФИИ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ИЗОТОПНЫХ ДЕФЕКТΟΣКОПОВ	183
Лифшиц В.А., Осес Е.Р., Потрахов Е.Н. ТЕХНОЛОГИЯ ЭКСПРЕСС-ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МОНОКРИСТАЛЛОВ	184
Муханова Т.А. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СКАНИРУЮЩИЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ КОНТРОЛЬ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	187
Подымский А.А., Жамова К.К. МИКРОФОКУСНЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ТРУБКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ С ВРАЩАЮЩИМСЯ АНОДОМ	189
Потрахов Н.Н., Грязнов А.Ю., Мазуров А.И. ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОИНФОРМАТИВНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ	192
Рогов Ю.Н. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МЕЧЕНЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КИМБЕРЛИТОВОЙ ПОРОДЫ	195
Усачев В.Е., Усачев Е.Ю., Гнедин М.М. ПЕРЕНОСНЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ КОМПЛЕКСЫ	198

Чахлов С.В., Осипов С.П., Клименов В.А., Темник А.К., Тонкоглаз В.А., Sun Xiaoming, Hu Xiaowei, Li Suqi. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВЕЩЕСТВ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ДУАЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ. АЛГОРИТМЫ И ЭКСПЕРИМЕНТ 201

Юмашев В.М., Самосадный В.Т., Кадилин В.В. ТРАНСМИССИОННАЯ РАДИАЦИОННАЯ ТОМОГРАФИЯ И ТОМОГРАФИЯ НА ОБРАТНОРАССЕЯННОМ ИЗЛУЧЕНИИ – ВОЗМОЖНОСТИ 205

Секция 5. Оптические, тепловые, микроволновые методы НК и ТД

Руководители секции: Вавилов В.П., Абрамова Е.В., Матвеев В.И.

Абрамова Е.В., Быстрова Н.А., Белкин В.К., Галкин Д.И., Онопко Н.В. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ В ЭКСПЕРТИЗЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ 206

Бардаков А.В. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВИЗОРОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРОБЛЕМ С КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ 209

Бардаков А.В. НОВЫЕ ТЕПЛОВИЗОРЫ FLUKE T1400, T1300, T1200 И ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ФОКУСИРОВКИ LASERSHARP™ 210

Бекаревич А.А., Велиахметов С.А., Чумаков А.Г., Будадин О.Н. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ ЛОПАТОК ТУРБИН ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СЛОЖНОЙ КОНСТРУКЦИИ 211

Будадин О.Н., Кульков А.А. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДИАГНОСТИКИ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ 215

Будадин О.Н., Абрамова Е.В., Лизунов О.Н. НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБЪЕКТИВНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ В РЕАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ 217

Горелов М.В. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ЧЕРЕЗ СВЕТОПРОЗРАЧНЫЕ ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ	220
Данилин Н.С., Димитров Д.М., Сабиров И.Х., Колесников Н.П., Булаев И.Ю., Белов Д.А. РОЛЬ ИК-ДИАГНОСТИКИ В ОБЕСПЕЧЕНИИ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ В КОРПУСЕ	224
Демин А.В. ОЦЕНКА ХАРАКТЕРНЫХ РАЗМЕРОВ НАНОЧАСТИЦ В МЕЗОСКОПИЧЕСКИХ КОМПОЗИТАХ ПО ИХ ДИСПЕРСИОННЫМ ЗАВИСИМОСТЯМ	224
Дорофеев И.О., Дунаевский Г.Е. О ВОЗМОЖНОСТИ КВАЗИОПТИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРНОГО КОНТРОЛЯ ЛОКАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ОСТЕКЛОВАННОГО ЛИТОГО МИКРОПРОВОДА	227
Захаренко В.А., Вальке А.А. ИНФРАКРАСНЫЙ ТЕРМОГРАФИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ВРАЩАЮЩИХСЯ ОБЖИГОВЫХ ПЕЧЕЙ	230
Козлов В.К., Гарифуллин М.Ш. ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ, НАПОЛНЕННЫХ ИЗОЛЯЦИОННЫМ МАСЛОМ НА ОСНОВЕ НАТУРАЛЬНЫХ СЛОЖНЫХ ЭФИРОВ	233
Кульков А.А., Будадин О.Н., Каледин В.О. ДИАГНОСТИКА КАЧЕСТВА КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ОДНООСНОГО СИЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ	236
Лушников А.В. ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ, КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ	238
Матвеев В.И., Пугачев С.В. МИКРОВОЛНОВЫЙ КОНТРОЛЬ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ	239
Махов В.Е., Репин О.С., Потапов А.И. МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ АТТЕСТАЦИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ	240

Мурашов В.В., Сорокин К.В. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ УГЛЕПЛАСТИКИ С ИНТЕГРИРОВАННЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ СЕНСОРАМИ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПРЕДДЕФЕКТНОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА	243
Науменко А.П., Бойченко С.Н., Тарасов Е.В., Заренбин А.В. ОПТОВОЛОКОННЫЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРЫ И ДЕФОРМАЦИИ РЕЗЕРВУАРА	247
Нитиевский А.А. ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОВМЕСТНОГО ПРОВЕДЕНИЯ ТЕПЛОВИЗИОННОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ СОВМЕСТНО С ИЗМЕРЕНИЕМ ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТИ МЕТОДОМ BLOWER DOOR (АЭРОДВЕРЬ) ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ И КАЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ЦЕЛОСТНОСТИ ВОЗДУШНОГО БАРЬЕРА ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ	248
Паулиш А.Г., Загубисало П.С., Кузнецов С.А., Федоринин В.Н. ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ КОНВЕРТЕР МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ИНФРАКРАСНОЕ НА ОСНОВЕ МЕТАМАТЕРИАЛА ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАТОРА ММ ИЗЛУЧЕНИЯ	249
Петров К.В. НЕОБХОДИМОСТЬ МОНИТОРИНГА АППАРАТОВ КОЛОННОГО ТИПА В НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ТЕПЛОВИЗИОННЫМ МЕТОДОМ	252
Сергеев С.С. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИНФРАКРАСНЫХ МЕТОДОВ НК И КОНТАКТНЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ	255
Сергеев С.С. ПИРОМЕТР ИЛИ ОПТИЧЕСКИЙ ТЕРМОМЕТР. ВОПРОСЫ ТЕРМИНОЛОГИИ	255
Троицкий-Марков Т.Е. ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПРИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБСЛЕДОВАНИЯХ МНОГОКВАРТИРНЫХ ЖИЛЫХ ДОМОВ	257
Шашкин В.И., Белов Ю.И., Волков П.В., Горюнов А.В., Илларионов И.А., Серкин А.Г. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ АКТИВНОЙ СИСТЕМЫ РАДИОВИДЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА	259

Якубов В.П., Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н., Клоков А.В. ПОРТАТИВНЫЙ СШП РАДИОТОМОГРАФ	263
---	------------

Секция 6. Течеискание, капиллярные, комбинированные методы НК и ТД

Руководители секции: Сажин С.Г., Мигун Н.П., Туробов Б.В.

Бакулин В.Н., Ларин А.А., Резниченко В.И. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ И ЖЕСТКОСТНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	267
Баранова Н.И., Сажин С.Г. ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ КАРБАМИДА	268
Глазков Ю.А. О ЛОЖНЫХ ДЕФЕКТАХ ПРИ КАПИЛЛЯРНОМ КОНТРОЛЕ	272
Гоголинский К.В., Потапов А.И., Сясько В.А. КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА МИКРО- И НАНОМЕТРОВОМ МАСШТАБЕ	273
Зубков И.Л. РАЗРАБОТКА МУЛЬТИСЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ВОЗДУХА НАСЕЛЕННЫХ МЕСТ	275
Костиков Е.С., Лобаев А.Н., <u>Мясников В.М.</u> КОНЦЕНТРАЦИЯ УТЕЧКИ ГАЗА В ПОДВИЖНОЙ ПОРИСТОЙ МЕМБРАНЕ	278
Мигун Н.П., Деленковский Н.В., Гнусин А.Б. ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ КАПИЛЛЯРНЫЙ КОНТРОЛЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОСВЕТИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ФИОЛЕТОВЫХ СВЕТОДИОДОВ	281
<u>Мясников В.М.</u> К ВОПРОСУ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ ЛОКАЛИЗАЦИЙ ТЕЧЕЙ	284
Наумов В.Н., Тихомиров К.А. ОРГАНИЗАЦИЯ РАЗРАБОТКИ НОРМАТИВНЫХ МЕТОДИЧЕСКИХ ДОКУМЕНТОВ ПО КОНТРОЛЮ ГЕРМЕТИЧНОСТИ	286
Николаева Н.С., Сырямкин В.И. НЕЙРОСЕТЕВЫЕ АЛГОРИТМЫ ДИАГНОСТИКИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ	287

Николаева Н.С., Горбачев С.В., Сырякин В.И., Богомолов Е.Н., Сунцов С.Б. НЕЙРОСЕТЕВЫЕ АЛГОРИТМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ПЕРЕСЕКАЮЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ СИСТЕМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ	290
Рафиков Р.Х. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ЭЛЕКТРОВОЗОВ	293
Сажин С.Г., Пенкин К.В. ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ЭТАНОЛАМИНОВ	296
Сажин С.Г., Сумкин П.С., Моисеев Ю.Н., Гребеньков П.М. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ НА ОБЪЕКТАХ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ (ГАЗОПОТРЕБЛЕНИЯ) ...	299
Сажин С.Г., Тараненко Е.В., <u>Мясников В.М.</u> АНАЛИЗ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА ГЕРМЕТИЧНОСТИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОБЪЕКТОВ	303
Тихомиров К.А., Наумов В.Н. РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ	306
Филинов М.В. ТЕСТ-ОБЪЕКТ С ОДИНОЧНЫМ ДЕФЕКТОМ ПРОТИВ МОНИТОРА СИСТЕМЫ КАПИЛЛЯРНОГО КОНТРОЛЯ	308

Секция 7. Методы НК и ТД остаточного ресурса

Руководители секции: Махутов Н.А., Матвеев В.И.

Батов Г.П., Ермолаев А.А., Копытов С.Г. ПРОВЕДЕНИЕ НК НДС ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ	311
Бурков М.В., Панин С.В., Любутин П.С., Алтухов Ю.А., Еремин А.В. ПРИМЕНЕНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ДАТЧИКОВ-ФОЛЬГ ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ КОМПОЗИТОВ, АРМИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ ВОЛОКНАМИ	313
Венгринович В.Л., Клименко С.В. ОБРАЩЕНИЕ МНОГО-СЕНСОРНЫХ ДАННЫХ В ПРОБЛЕМЕ ОЦЕНКИ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА	316

Дубов А.А. ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА И РИСКА НА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСПРЕСС-МЕТОДОВ НК	319
Загидулин Р.В., Загидулин Т.Р. ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ И МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ПО ВЕЛИЧИНЕ ПОЛЯ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ МЕТАЛЛА	321
Иванов В.И., Корнилова А.В., Мусатов В.В., Сергиев Б.П. НЕИЗБЕЖНОСТЬ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПРИ ОЦЕНКЕ РИСКА АВАРИИ	325
Карпов В.М. АНАЛИЗ ЭМПИРИЧЕСКИХ ДАННЫХ В ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ	326
Кузнецов К.А. КОНЦЕПЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ КАК СРЕДСТВА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА	329
Лозовский В.Н. ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА АВИАТЕХНИКИ ПРИ ЛЕТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЯХ	332
Махутов Н.А., Гаденин М.М. ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА КРИТИЧЕСКИ И СТРАТЕГИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ В ШТАТНЫХ И НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЯХ	333
Махутов Н.А., Разуваев И.В. КОМПЛЕКСЫ ИНТЕГРАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ АНАЛИЗА РИСКОВ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ	336
Мусатов В.В. СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОСНОВНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО, НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО И ХИМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСОВ	337
Науменко А.П., Бойченко С.Н., Тарасов Е.В., Заренбин А.В. ОПТОВОЛОКОННЫЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРЫ И ДЕФОРМАЦИИ РЕЗЕРВУАРА	338

Сорокин К.В., Мурашов В.В. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ УГЛЕПЛАСТИКИ С ИНТЕГРИРОВАННЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ СЕНСОРАМИ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПРЕДДЕФЕКТНОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА . . .	339
Ткаченко А.А. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОСВАРНЫХ ТРУБ В ПОТОКЕ ПРОИЗВОДСТВА	343
Филинов М.В., Фурсов А.С. РОЛЬ НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ МЕТАЛЛОГРАФИИ В ОЦЕНКЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА	345

Секция 8. Вибродиагностика

Руководители секции: Зусман Г.В., Костюков В.Н.

Гетманов В.Г., Фирсов А.А. АППРОКСИМАЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ ВИБРОСКОРОСТЕЙ ДЛЯ ДОПЛЕРОВСКИХ СИСТЕМ АКУСТИЧЕСКОГО, РАДИО И ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНОВ	347
Зусман Г.В. НОВЫЙ ЭФФЕКТ В ДИНАМИКЕ МЕХАНИЧЕСКОГО КОНТАКТА МЕТАЛЛ-МЕТАЛЛ И ВИБРОДИАГНОСТИКА ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ПЕРЕНОСНЫМИ ПРИБОРАМИ	351
Карасев В.А., Петров Н.И., Николаев С.М., Назаренко Г.М., Лаврентьев Ю.Л., Жильников Е.П., Кондратьев М.И., Волков Е.С. ВИБРОДИАГНОСТИКА ПОГРАНИЧНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	351
Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Павленков Д.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ХЕРСТА ДЛЯ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСНОГО АГРЕГАТА	352
Костюков Ал.В., Цурпаль А.Е., Басакин В.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ УЗЛОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ РЕЛЬСОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА	353
Костюков Ал.В., Зайцев А.В., Казарин Д.В. ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ВИБРОДИАГНОСТИРОВАНИЯ РОТОРНЫХ АГРЕГАТОВ	355

Костюков В.Н. ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ОБОРУДОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА	357
Науменко А.П. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ТЕХНОЛОГИИ ВИБРОДИАГНОСТИРОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА ПОРШНЕВЫХ МАШИН В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ	358
Николаев С.М., Карасев В.А., Петров Н.И., Лаврентьев Ю.Л., Назаренко Г.М. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОБСТВЕННЫХ ФОРМ КОЛЕБАНИЙ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ С ЛОКАЛЬНЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ НА ВИБРОСИГНАЛЫ	362
Решетов А.А. УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ ПОВРЕЖДЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ЭНЕРГОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В РЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМАХ	365
Сахаров С.А., Бузанов О.А., Забелин А.Н., Аленков В.В. КРИСТАЛЛЫ ЛГТ И КТГС ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ	369
Соколов Д.В., Мынцов А.А., Кореев А.А. ДООСНАЩЕНИЕ СИСТЕМАМИ ДИАГНОСТИКИ	370
Старых М.Н., Подвальный А.М. ОСОБЕННОСТИ БАЛАНСИРОВКИ РОТОРОВ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ В СОБСТВЕННЫХ ОПОРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИХРЕТОКОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ	372
Шорр Б.Ф., Иванов И.И., Карасев В.А., Назаренко Г.М., Петров Н.И. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ПОВРЕЖДЕНИЙ НАРУЖНОГО КОЛЬЦА И ТЕЛ КАЧЕНИЯ ПОДШИПНИКА	374

Секция 9. Акустическая эмиссия

Руководители секции: Иванов В.И., Муравьев В.В.

Аугутис В., Ваштакас Э. ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	376
Бахматов П.В., Муравьев В.И., Лончаков С.З., Плетнев Н.О., Пичык В.С. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ НА СОДЕРЖАНИЕ ВОДОРОДА В ПОВЕРХНОСТНОМ ДЕФЕКТНОМ СЛОЕ	378

Башков О.В., Панин С.В., Бяков А.В., Попкова А.А. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТЕРИЕВ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ	382
Башков О.В., Попкова А.А., Башкова Т.И. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ОБОБЩЕННОЙ ДИАГРАММЫ УСТАЛОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ	385
Быков С.П., Фиклистов А.Г., Петухов Ю.В., Скрябиков И.Н. АЭ КОНТРОЛЬ СОСУДА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ ПРОЧНОСТИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ДО РАЗРУШЕНИЯ	388
Бяков А.В., Панин С.В., Башков О.В., Полтаранин М.А., Бурков М.В. ЛОКАЦИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ...	392
Гомера В.П., Нефедьев Е.Ю., Смирнов А.Д. МЕТОДИКА РАЗДЕЛЕНИЯ ЛОКАЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ПРИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОМ КОНТРОЛЕ АППАРАТОВ, СОДЕРЖАЩИХ ВНУТРЕННИЕ УСТРОЙСТВА	394
Елизаров С.В., Барат В.А., Чернов Д.В., Матвиенко Ю.Г., Иванов В.И., Васильев И.Е. КОМПЛЕКСНАЯ ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХРУПКИХ ТЕНЗОПОКРЫТИЙ И АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	397
Елизаров С.В., Барат В.А., Шиманский А.Г., Фирсов А.А. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННАЯ СИСТЕМА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ	399
Лончаков С.З., Башков О.В., Муравьев В.И., Фролов А.В. ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПАРАМЕТРЫ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	401
Милецкий Б.И., Ткаченко А.А., Шарапановский Д.В. ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЙ СИСТЕМЫ АЕС-USB ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТРУБ В ПРОЦЕССЕ ИХ ГИДРОИСПЫТАНИЙ	405
Муравьев В.В. ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ АЭ СТЕНДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ	406

Овчарук В.Н. К ВОПРОСУ ОБ ИЗМЕРЕНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	410
Овчарук В.Н. МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ АКУСТИЧЕСКО-ЭМИССИОННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ	414
Параев С.А., Бутусов О.Б., Волкова Е.Э. ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ	417
Параев С.А., Бутусов О.Б., Волкова Е.Э. ПРИМЕНЕНИЕ САМООБУЧАЮЩИХСЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ	418
Петерсен Т.Б., Шемякин В.В., Черниговский В.Ю. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ДАННЫХ АЭ МОНИТОРИНГА В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ШУМОВ	418
Попов А.В. СИСТЕМА ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ПРИГОДНОСТИ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ИНВАРИАНТОВ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ПРОЦЕССОВ	421
Разуваев И.В. НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ КОМПЛЕКСОВ ИНТЕГРАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ	425
Растегаев И.А., Виноградов А.Ю., Мерсон Д.Л., Чугунов А.В. ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ИСПЫТАНИИ СОСУДА РАБОТАЮЩЕГО ПОД ДАВЛЕНИЕМ С РАССЛОЕНИЕМ СТЕНКИ	425
Савельев В.Н., Савельев Д.В., Тишкин А.П. СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ С ПРИОРИТЕТОМ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ	428
Самохвалов А.Б. ЛОКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ АЭ НА ОБЪЕКТАХ СЛОЖНОЙ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕГУЛЯРНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СЕТЕВОЙ МОДЕЛИ	430

Северов П.Б., Васильев И.Е., Матвиенко Ю.Г., Иванов В.И., Панков А.В. АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ НАКОПЛЕНИЯ РАССЕЯННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ СЛОИСТОГО УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ	433
Физулаков Р.А., Муравьев В.И. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ОДНООСНОМ НАГРУЖЕНИИ ТИТАНОВЫХ ОБРАЗЦОВ С ЦЕЛЬЮ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА РАСКРОЯ	435
Фролов А.В., Муравьев В.И., Пицык В.С. КОНТРОЛЬ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	436

Секция 10. Антитеррористическая диагностика

Руководители секции: Ковалев А.В., Матвеев В.И.

Ахметханов Р.С., Дубинин Е.Ф., Резников Д.И. ЗАЩИЩЕННОСТЬ, МОНИТОРИНГ И ДИАГНОСТИКА ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНОСТИ ТЕРРОРИСТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ	439
Бажанов А.С., Дутышев И.Н., Марчук В.Н., Местэртон А.П., Посошенко Л.З., Скопин В.И., Матвеев В.И. РАДАРЫ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ	443
Буклей А.А., Баранов А.В., Емельянов М.Е., Паршин И.А. НОВЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА, ПОСТРОЕННЫЕ НА МЕТОДЕ РЕГИСТРАЦИИ ОБРАТНО РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	446
Ковалев А.В., Кекин А.Г., Ненахов Ю.Ю., Ивченков А.О., Филимонов С.А. НОВЫЕ РЕШЕНИЯ В АНТИТЕРРОРИСТИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ	447
Ковалев А.В. СПЕЦИАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА НАБЛЮДЕНИЯ И ДОСМОТРА, ОРГАНИЗАЦИЯ ПУНКТОВ ПРОПУСКА (ДОСМОТРА)	449
Ковалев А.В., Студитский А.С., Кекин А.Г. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ	454
Рогачев А.В. ДЕТЕКТОРЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДА МЕЧЕНЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ (ДОСМОТРА) ОБЪЕКТОВ ПОД ВОДОЙ	455

Сапожников М.Г. ДЕТЕКТОРЫ ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА МЕЧЕННЫХ НЕЙТРОНОВ	459
Семенов Ю.В., Манушкин А.А., Усачев Е.Ю., Усачев В.Е. МАЛОГАБАРИТНЫЙ РАДИАЦИОННЫЙ ИНТРОСКОП С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ ПАНЕЛИ	462
Усачев Е.Ю., Штейн М.М., Щетинкин С.А., Чахлов С.В., Лебедев М.Б. ИНСПЕКЦИОННО-ДОСМОТРОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ОБСЛЕДОВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНОГО ТРАНСПОРТА И МОРСКИХ КОНТЕЙНЕРОВ	462
Усачев Е.Ю., Передерий А.Н., Ольшанский Ю.И., Семейкин Н.П. КОМПЛЕКС ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ В РУЧНОЙ КЛАДИ	463
Цыбульский Е.А., Матвеев В.И. ПРИМЕНЕНИЕ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И БОРЬБЫ С ТЕРРОРИЗМОМ	463
Эпинатьев И.Д., Рошин А.В., Кумпаненко И.В. МОДИФИЦИРОВАННЫЙ СПЕКТРОМЕТР ПОДВИЖНОСТИ ИОНОВ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ: MODIFICATED ION MOBILITY SPECTROMETER FOR DETECTION AND RECOGNITION OF EXPLOSIVES	467

Секция 11. Сертификация персонала, стандартизация, метрология методов НК и ТД

Руководители секции: Коновалов Н.Н., Артемьев Б.В.

Азизова Е.А. ОПЫТ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ СЕРТИФИКАЦИИ ПЕРСОНАЛА В УЗБЕКИСТАНЕ	469
Артемьев Б.В., Артемьев И.Б. СИСТЕМА ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА РОНКТД	469
Быстрова Н.А., Галкин Д.И. СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ СИСТЕМЫ АТТЕСТАЦИИ ПЕРСОНАЛА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ	470
Быстрова Н.А., Галкин Д.И. К ВОПРОСУ О ПРОВЕДЕНИИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ	472

Волкова Н.Н., Муллин А.В., Стрижаков В.М., Каксис Ю.А. ОПЫТ И ПРОБЛЕМЫ ПОДГОТОВКИ «НУЦ «КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА» К ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В КАЧЕСТВЕ СТОРОННЕГО АГЕНТСТВА В СООТВЕТСТВИИ С АЭРОКОСМИЧЕСКИМ СТАНДАРТОМ EN 4179:2009	474
Волкова Н.Н., Муллин А.В. МНОГОСТОРОННЕЕ СОГЛАШЕНИЕ О ПРИЗНАНИИ МЕЖДУНАРОДНОГО КОМИТЕТА ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ ICNDT MRA – ДВИЖЕНИЕ К ГЛОБАЛЬНОЙ ГАРМОНИЗАЦИИ СЕРТИФИКАЦИИ ПО ISO 9712	477
Волкова Н.Н., Муллин А.В., Стрижаков В.М., Каксис Ю.А. ОБ ОПЫТЕ РАЗРАБОТКИ «НУЦ «КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА» ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО СТАНДАРТА «СПЕЦИАЛИСТ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»	477
Иванов В.И., Коновалов Н.Н., Дергачев А.Н. ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ	480
Коновалов Н.Н., Дергачев А.Н. ОЦЕНКА КОМПЕТЕНТНОСТИ СПЕЦИАЛИСТОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В СООТВЕТСТВИИ С ПБ 03-440-02 И ДОКУМЕНТАМИ СДСПНК РОНКТД	481
Коновалов Н.Н. КОМПЬЮТЕРИЗАЦИЯ СРЕДСТВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ЕГО МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ	483
Коновалов Н.Н., Мелешко Н.В. О ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ОБЛАСТИ АТТЕСТАЦИИ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО УЛЬТРАЗВУКОВОМУ КОНТРОЛЮ	484
Копытов С.Г., Батов Г.П. ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ ВСЕРОССИЙСКИХ КОНКУРСОВ СПЕЦИАЛИСТОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ	486
Муравьев В.В. ОБУЧЕНИЕ И СЕРТИФИКАЦИЯ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ В ИЖГТУ ИМЕНИ М.Т. КАЛАШНИКОВА	488
Полковников А.В., Горбачев В.И. РАЗРАБОТКА, ВЫПУСК И ПЕРЕДАЧА НА АЭС УЧЕБНЫХ ПОСОБИЙ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ И АТТЕСТАЦИИ КОНТРОЛЕРОВ ПО НЕРАЗРУШАЮЩИМ И РАЗРУШАЮЩИМ МЕТОДАМ КОНТРОЛЯ	492
Соловьева М.О., Пономарева И.Н. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С ЭКЗАМЕНАЦИОННЫМИ ЦЕНТРАМИ ОРГАНА ПО СЕРТИФИКАЦИИ ПЕРСОНАЛА В СООТВЕТСТВИИ С ISO 17024 И ISO 9712	493

Страгнефорс С.А. СОЗДАНИЕ ОРГАНА ПО ПОДТВЕРЖДЕНИЮ СООТВЕТСТВИЯ ПЕРСОНАЛА	496
Филатова Н.Е. ГАРМОНИЗАЦИЯ ТРЕБОВАНИЙ К НЕЗАВИСИМЫМ ОРГАНАМ ПО АТТЕСТАЦИИ (СЕРТИФИКАЦИИ) ПЕРСОНАЛА С ISO/IEC 17024:2012	497
Фирстов В.Г. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ И РЕАЛИЗАЦИИ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОГРАММ	498

Секция. 12. Academia NDT International

Руководитель секции: Дж. Нардони

Венгрилович В.Л., Клименко С.В. ОБРАЩЕНИЕ МНОГОСЕНСОРНЫХ ДАННЫХ В ПРОБЛЕМЕ ОЦЕНКИ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА	499
Горкунов Э.С. ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ	499
Mihovsky M. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ	499
Мазал П. ПОДГОТОВКА 11-й ЕВРОПЕЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ	499
Нардони Д. МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ НДТ	499
Пуршке М. ПОДГОТОВКА 19-й ВСЕМИРНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО НДТ И ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЕВРОПЕЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ НДТ	499
Serge Dos Santos, Martin Lints, Jennifer Chaline and Andrus Salupere NONLINEAR TIME REVERSAL USING SOLITONIC WAVES IN DISPERSIVE MEDIA: POTENTIAL APPLICATION FOR NONLINEAR NDT	500
Ткаченко А.А. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОМПЛЕКСНОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОСВАРНЫХ ТРУБ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ	501
Фарлей М. О ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ICNDT	505
Именной указатель	506

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

ЗАО «НИИИН МНПО «Спектр» – 50

Клюев В.В.

6 мая 1964 года распоряжением ВСНХ СССР для разработки теоретических основ и создания методов и средств внутривидения государством был создан Научно-исследовательский институт интроскопии-«НИИИН» общей численностью 80 человек.

Первым директором НИИИН был назначен, один из изобретателей радиолокации, профессор Ощепков П.К. С 1970 года директором НИИИН работает Клюев В.В. – академик РАН, член Европейской академии.

В 1975 году во главе с НИИИН было создано МНПО «Спектр», которое работало с заводами Москвы, Московской области, Украины, Белоруссии, Казахстана, Кабардино-Балкарии, а также с фирмами Англии (GME), Франции (Апелем), Германии (LVQ, «Себа Динаэлектроник», «Kowotest») и США.

В 1989 году МНПО «Спектр» было выкуплено у государства и стало самостоятельным закрытым акционерным обществом ЗАО МНПО «Спектр».

В 2001 году ЗАО «НИИИН МНПО «Спектр» создал ассоциацию 25 ведущих в области НК и ТД Российских предприятий «Спектр-групп», в которую вошли ООО «Эхо +», «Диагностика-М», «Вигор», «Вемо» и др. организации.

В НИИИНе были созданы первые в стране промышленные рентгеновские томографы и толщиномеры, вихретоковые виброметры, тепловизоры, радиометры, магнитометры, диагностические комплексы для антитерроризма, для космических кораблей «Буран», «Союз», «Мир», медицинские рентгеновские диагностические и терапевтические аппараты и др.

За 50 лет сотрудники НИИИН создали более 770 типов приборов, опубликовали более 620 монографий и 10000 научных статей, получили 5000 авторских свидетельств и патентов на изобретения, а также государственные премии по науке и технике, премии СМ СССР и Правительства РФ по технической диагностике и неразрушающему контролю.

В институте много лет работали выдающиеся ученые в области НК и ТД профессора: Мужижкий В.Ф., Соснин Ф.Р., Кронгауз А.Н., Гораздовский Т.Я., Тихомиров В.В., Федосенко Ю.К., Еремин Н.И. и многие другие талантливые специалисты. Сотрудники НИИИН создал большое количество новых предприятий по НК и ТД (Ю.М. Шкарлет, Э.И. Вайнберг, Д.А. Гречинский, Г.В. Зусман, А.В. Ковалев, Б.М. Кантер, З.В. Клюев, А.А. Самокрутов и др.)

НИИИН был главным организатором в г.Москве 10-й всемирной конференции по неразрушающему контролю в 1982 году и 10-й Европейской конференции в 2010 году.

Диагностика всегда была и будет главной составляющей для решения проблем безопасности и здоровья человека, и потому основными направлениями НИИИИН остаются:

1. Медицинская рентгеновская диагностика (Б.М. Кантер)
2. Антитеррористическая диагностика (А.В. Ковалев)
3. Техногенная диагностика (А.А. Самокрутов, В.Г. Шевалдыкин, А.Г. Ефимов, Н.Р. Кузелев)
4. Экологическая диагностика (В.Н. Кольцов, А.В. Изотов, Ю.А. Кондратьев)

РАЗЛИЧНЫЕ СОСТОЯНИЯ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ И ИХ УСТОЙЧИВОСТЬ К ВНЕШНИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Горкунов Э.С.

Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Намагниченность ферромагнетика (M) не только зависит от величины намагничивающего поля (H), но и является функцией целого ряда таких факторов, как температура (T), переменное магнитное поле (H), механические напряжения (σ), время, химические превращения. Эти факторы действуют лишь при наличии внешнего постоянного магнитного поля или в случае, когда ферромагнетик находится в состоянии остаточной намагниченности. Поэтому наблюдаемая в элементах конструкций остаточная намагниченность может быть результатом действия почти всех указанных факторов.

Максимальные значения остаточных намагниченностей могут приобретаться в различных полях и в различных условиях. В свою очередь, различным образом приобретенные остаточные намагниченности по разному устойчивы к действию размагничивающих полей и внешних факторов. Устойчивость магнитных состояний к воздействию H , σ и T будет определяться магнитными константами ферромагнетика, соотношением обратимых и необратимых процессов, характером их протекания при перемагничивании, то есть степенью взаимодействия доменных границ с различного рода дефектами, существующими в большом количестве в реальных ферромагнитных материалах, из которых изготовлены элементы машин и механизмов.

Основной причиной, определяющей устойчивость магнитных состояний к действию магнитных и электромагнитных полей, а также упругих деформаций в сталях, является задержка смещения доменных границ вследствие их взаимодействия с магнитными несовершенствами материала, под которыми будем понимать любые дефекты, приводящие к закреплению доменных границ на них. Критическое поле, необходимое для отрыва сме-

щающейся доменной стенки от магнитного несовершенства, будет зависеть от типа несовершенства, поэтому коэрцитивная сила, являющаяся усредненной характеристикой распределения критических полей в материале, будет зависеть от различных структурных факторов. Коэрцитивная сила, являющаяся структурночувствительной магнитной характеристикой, отражает интегральные свойства ферромагнетика и характеризует его общую устойчивость к внешним воздействиям. Более точные сведения о протекании процессов намагничивания и перемагничивания, о взаимодействии доменных границ с определенными типами дефектов можно получить при исследовании устойчивости конкретного магнитного состояния (например, остаточной намагниченности) к воздействиям магнитных, электромагнитных полей, упругих и пластических деформаций и температуры.

Остаточная намагниченность (индукция) является структурночувствительной магнитной характеристикой, величина которой зависит от структурных параметров ферромагнетика (кристаллической структуры, размера зерна, величины внутренних напряжений, присутствия различного рода включений), магнитной текстуры, доменной структуры и его геометрических размеров, что определяет распределение и устойчивость магнитных фаз в нем. Остаточно намагниченное состояние ферромагнетика является метастабильным, разрушение его под действием различных физических факторов (магнитные и электромагнитные поля, упругая и пластическая деформация, температура) зависит от намагниченности, приобретенной им различными способами ранее.

Таким образом, устойчивость остаточной намагниченности отдельных элементов стальных конструкций будет зависеть от способа ее приобретения и структурного состояния металла, поэтому используя так называемый «метод магнитной памяти» следует помнить, что состояние остаточной намагниченности и ее изменения зависят от очень многих параметров, а не только от изменения напряженно-деформированного состояния.

ТЕПЛОЙ КОНТРОЛЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ: ВОЗРОЖДЕНИЕ ИНТЕРЕСА И ВОЗМОЖНОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Вавилов В.П.

Томский политехнический университет

За последние 10 лет объем использования композиционных материалов в гражданских самолетах возрос не менее чем на порядок, а в военной авиации достиг чуть ли не физического предела. В то же время, по данным корпораций Boeing и Airbus, около 50 % разрушений несущих конструкций самолетов приходится именно на композиты. Наглядным примером дефектной ситуации является наличие влаги в сотовых конструкциях. Ха-

рактурным видом дефектов углепластика являются ударные повреждения, причем, если «высокоэнергетические» дефекты, например, возникшие вследствие удара птиц, визуально легко выявляются и ремонтируются, то «низкоэнергетические» повреждения (удары при загрузке багажа, град) являются скрытыми дефектами и могут привести к неожиданным отказам. Вышеуказанная ситуация создала благоприятные условия для развития и внедрения в авиапромышленность теплового контроля (ТК). По-видимому, впервые, наряду с диагностикой в энергетике и строительстве, этот метод заявил о своей уникальности при расследовании причин катастрофы космического челнока «Колумбия». В последующие годы тепловой метод был официально признан ведущими мировыми авиастроительными фирмами.

Первые практические процедуры ТК носили качественный характер и были связаны с интерпретацией инфракрасных (ИК) термограмм опытными операторами. Например, обнаружение воды в сотах является рутинной процедурой контроля в вышеупомянутых корпорациях Boeing и Airbus, в основном, в процессе ремонта и обслуживания в ангарах, в то время как в России усилиями Томского политехнического университета и ГосНИИ ГА была разработана процедура контроля скрытой воды непосредственно после посадки самолетов, которая имеет как самостоятельную ценность, так и может быть использована в виде дополнения к ультразвуковому контролю высоты столбика воды в сотах. Важной особенностью последней декады явилось также появление на рынке коммерческих тепловых дефектоскопов фирм Thermal Wave Imaging, Automation Technology, Edevis и др.

Комбинирование экономичных серийных устройств ТК с достижениями в области теории теплопроводности дефектных структурах, обработки ИК изображений и создания алгоритмов решения обратных задач позволяет надеяться на разработку таких способов ТК, где слово «количественный» относится не к измерению температуры, а к экспрессному определению теплофизических свойств материалов, включая анализ их анизотропии, а также оценку параметров скрытых дефектов как результат решения многопараметрической обратной задачи. При этом важным моментом является установление связи между «серьезностью» дефекта и выбранным параметром его идентификации. В Томском политехническом университете выполнены исследования по ТК ударных повреждений в углерод углеводородных композитах, в результате чего в односторонней процедуре возможно построение карт тепловой инерции, а в двухсторонней - карт теплопроводности, которая коррелирует с энергией ударного повреждения (исследован диапазон низких энергий от 5 до 30 Дж). «Классический» ТК с использованием оптического нагрева может быть дополнен ультразвуковой стимуляцией трещин в композитах, в результате чего реализуют принцип так называемого «темного поля», когда дефекты генерируют тепловую энергию вследствие внутреннего трения, а начальная температура основного материала не изменяется.

СЕКЦИЯ 1. МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ НК И ТД

Руководители секции: Бакунов А.С., Горкунов Э.С.

СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ ИЗМЕРЕНИЯ СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Бакунов А.С., Кудрявцев Д.А., Рогова В.С.
ЗАО «НИИИИИ МНПО «Спектр»

Слабые электромагнитные поля являются экологически значимым фактором внешней среды, влияющим на многие биологические процессы. Многолетние исследования в этой области говорят о том, что магнитные поля с определенными параметрами представляют потенциальную угрозу здоровью людей. В последнее время вследствие появления и широкого распространения новых электронных и коммуникационных технологий ежедневная доза облучения населения электромагнитными полями быстро растет. Несколько лет назад группа ученых и экспертов в области здравоохранения из США, Швеции, Дании, Австрии и Китая выпустила 650-страничный доклад о влиянии магнитных полей на организм человека. Ученые ссылались на более чем 2000 исследований, доказавших, что длительное действие излучений низкого уровня может вызвать различные раковые заболевания, ухудшить иммунитет, привести к болезни Альцгеймера, болезням сердца и многим другим. Поэтому проведение исследований воздействий слабых магнитных полей на человека становится все более актуальным. Стандарты электромагнитной безопасности разрабатывают различные национальные и международные организации: европейский комитет по электротехническому нормированию, Национальный американский институт стандартов, НИИ медицины труда РАМН, Всемирная организация здравоохранения и др. В настоящее время стандарты безопасности для различных стран отличаются в десятки раз, что указывает на недостаточность научных исследований в этой области.

В связи с этим остро стоит задача контроля уровней и параметров слабых магнитных полей с целью исключения негативного влияния на организм человека. В докладе рассматриваются проблемы измерения слабых магнитных полей, анализируются существующие современные приборы для измерения слабых магнитных полей, обсуждаются их характеристики, достоинства и недостатки. Предложены варианты улучшения параметров измерителей слабых магнитных полей.

ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОГО И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ, ВКЛЮЧАЯ ПРОГНОЗ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПО ИЗМЕРЕНИЯМ МАГНИТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ – КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ

Безлюдько Г.Я.¹, Попов Б.Е.², Соломаха Р.Н.³

¹ООО ФИРМА «СПЕЦИАЛЬНЫЕ НАУЧНЫЕ РАЗРАБОТКИ», г. Харьков, Украина

²Инженерно-консультативный центр ИКЦ КРАН, Москва, Россия

³ООО «Магнитометрическая диагностика», Москва, Россия

В докладе рассматривается обобщенный аналитический и графический вид зависимости величины коэрцитивной силы металла от срока службы конструкции, работающей в режиме мало и многоциклового усталости, или в смешанном режиме нагружения, а также в статике, чистой и циклической, включая и ползучесть. Как информационный параметр, коэрцитивная сила увеличивается до 400 % для малоуглеродистых конструкционных марок сталей широкого применения в процессе накопления усталостной микроповрежденности от состояния нового металла до начала разрушения на макроуровне. Границы работоспособности металла в коэрцитиметрическом представлении от исходного состояния (для нового металла) H_{c0} и до предельного H_{cB} (начала усталостного разрушения) – свои у каждой марки стали и являются характерными физическими константами. Разница между текущим значением $H_{c_{\text{текущ.}}}$ и H_{c0} характеризует отработанный ресурс, а между $H_{c_{\text{текущ.}}}$ и H_{cB} – остаточный ресурс. Разница между H_{c0} и H_{cB} определяет начальный потенциальный ресурс металла, расходование которого в процессе службы зависит от особенностей режима нагружения, также хорошо видимых при коэрцитиметрическом непрерывном или периодическом мониторинге. А коэрцитиметрией в процессе стеновых испытаний образцов растяжением до разрушения получаем классическую диаграмму напряженно-деформированного состояния, но в коэрцитиметрическом измерении.

Приборы-коэрцитиметры – магнитные структуроскопы серии КРМ-Ц позволяют легко и быстро выявить и очертить зоны концентрации напряжений, определить степень усталостной деградации металла в них количественно. Все это без тщательной зачистки поверхности, прямо через слой защитного покрытия толщиной порядка 6 мм, по реальной кривизне и ржавчине, с автоматическим программным построением распределений степени усталости металла по поверхности и по толщине контролируемого изделия. И ведением соответствующей электронной базы данных результатов экспертизы.

МАГНИТНЫЙ МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ ЗОН ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Кузеванов В.Ф.
Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Пластическая деформация распределяется не однородно по всему объему деформируемого изделия, а локализуется на некоторых его участках. Для этих участков характерна увеличенная плотность микродефектов, которые в дальнейшем могут привести к образованию микро- и макротрещин, а, следовательно, к разрушению изделия. Поэтому одной из актуальных проблем техногенной диагностики является задача создания неразрушающего оперативного способа обнаружения зон локализации пластической деформации как наиболее вероятных мест разрушения изделий, подвергаемых деформированию при изготовлении и в процессе эксплуатации.

Для решения этой задачи в случае изделий из ферромагнитных материалов можно использовать тот факт, что магнитная проницаемость таких материалов зависит от степени пластической деформации. В качестве примера на рис. 1 показана полученная нами для углеродистой стали Ст3 зависимость максимальной магнитной проницаемости μ_{\max} от степени деформации одноосным растяжением. Видно, что вследствие увеличения плотности дислокаций и других микродефектов с увеличением степени деформации μ_{\max} уменьшается. Поскольку, как уже отмечалось, плотность микродефектов повышена в зонах локализации деформаций, для них характерны пониженные значения магнитной проницаемости. Таким образом, при намагничивании изделий, содержащих зоны локализации деформации, вблизи этих зон будет наблюдаться увеличение магнитных потоков рассеяния.

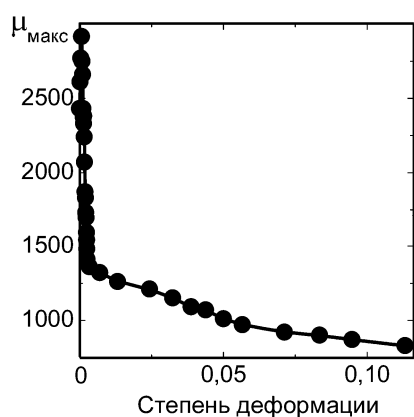


Рис. 1. Зависимость максимальной магнитной проницаемости стали Ст3 от степени деформации одноосным растяжением

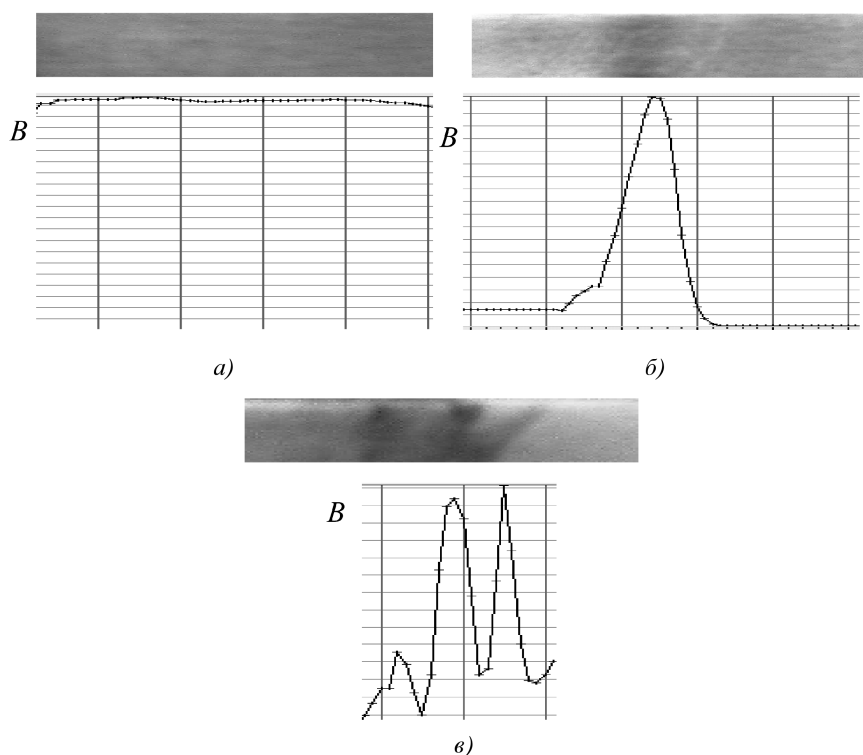


Рис. 2. Фотографии рабочих частей плоских разрывных образцов из стали Ст3 и результаты измерений индукции магнитных полей рассеяния (B) при сканировании поверхности этих образцов намагниченном состоянии феррозондовым датчиком:

a – недеформированный образец; $б$ – образец деформирован растяжением до образования одиночной полосы скольжения; $в$ – образец деформирован растяжением до образования множественных полос скольжения

С целью создания неразрушающего метода обнаружения зон локализации деформации в стальных изделиях из углеродистой стали Ст3 были изготовлены плоские разрывные образцы с головками по ГОСТ 1497–84. Визуальным осмотром не выявлено каких-либо дефектов на поверхностях этих образцов в исходном недеформированном состоянии. На рисунке 2, a показана фотография поверхности рабочей части одного из образцов в исходном состоянии. В случае, когда образец не деформирован, величина магнитной проницаемости материала образца в разных его участках одинакова, и распределение магнитной индукции B полей рассеяния, полученное путем сканирования поверхности намагниченного образца, не должно содержать экстремумов, что и подтверждается на эксперименте (см. рис. 2, a).

Намагничивание образцов проводили с помощью намагничивающего устройства на высокоэнергоемких постоянных магнитах, измерение величины B – с помощью феррозондового преобразователя.

На рисунке 2, б показаны фотография того же образца, что и на рис. 2, а, но после пластической деформации растяжением до образования одиночной зоны локализации деформации в виде полосы скольжения, а также результаты сканирования феррозондом рабочей части этого деформированного образца. Как видно, образование полосы скольжения сопровождается появлением экстремума на распределении индукции полей рассеяния по рабочей части образца. Место расположения полосы скольжения и экстремума B совпадают.

Фотография еще одного деформированного образца, содержащего три полосы скольжения, и результаты измерений индукции поля рассеяния при сканировании рабочей части этого образца феррозондовым датчиком показаны на рис. 2, в. Эти данные указывают на возможность выявления множественных зон локализации пластической деформации в изделиях из ферромагнитных материалов.

Таким образом, разработан магнитный метод обнаружения зон локализации деформации в изделиях из ферромагнитных материалов на стадии предразрушения, до появления макротрещин. Достоинством предлагаемого способа является его простота, надежность, оперативность и высокая чувствительность.

ОПЫТ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТРОЙНИКОВ, ОТВОДОВ, АРМАТУРЫ НА НЕФТЕПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ СТАНЦИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ МЕТАЛЛА

Дубов Ал.Ан.

ООО «Энергодиагностика», Москва, Россия

В процессе длительной эксплуатации тройников, отводов, арматуры и присоединительных трубопроводов на нефтеперекачивающих станциях происходят повреждения вследствие коррозионного и коррозионно-эрозийного износа внутренней поверхности. Определение зон указанных повреждений методами традиционного контроля, например, ультразвуковым методом представляет на практике проблему, так как место расположения этих зон, как правило, неизвестно.

В действующем руководящем документе [1] по неразрушающему контролю тройников, отводов, арматуры и присоединительных трубопроводов рекомендуется выполнить толщинометрию и выборочный контроль ультразвуковым методом сварных соединений.

Как показывает практика, выполнение неразрушающего контроля в случайных, неопределенных заранее местах указанных изделий является малоэффективным.

Для повышения эффективности неразрушающего контроля указанных изделий с целью определения развивающихся повреждений на внутренних стенках и в металле сварных соединений предлагается выполнять комплексный контроль методом магнитной памяти металла (МПМ) в сочетании с ультразвуковым методом. При таком комплексном контроле методом МПМ в режиме экспресс-контроля вначале определяются зоны концентрации напряжений (ЗКН), а затем в этих зонах выполняется ультразвуковой контроль и толщинометрия.

Известно, что основными источниками повреждений при эксплуатации различных изделий являются локальные ЗКН, которые образуются под действием рабочих нагрузок, в первую очередь, на дефектах металлургического и технологического происхождения. Именно для определения локальных ЗКН предназначен метод МПМ, и его применение должно быть первоочередным ко всем другим методам НК.

Метод МПМ принципиально отличается от всех известных магнитных методов НК тем, что при его применении не требуется искусственное намагничивание изделия, а используется естественная намагниченность, сложившаяся в процессе изготовления и эксплуатации. Метод МПМ не требует никаких подготовительных работ при выполнении контроля (зачистки металла и снятия краски). Благодаря установленной связи между магнитными и механическими параметрами, используемыми при контроле методом МПМ, предоставляется возможность определять уровень концентрации напряжений на выявленных дефектах, т.е. указывать степень их опасности для развития повреждения [2].

В докладе рассматриваются возможности комплексного контроля методами МПМ и ультразвука арматуры, тройников, отводов и присоединительных трубопроводов на нефтеперекачивающих станциях.

Литература

1. РД-19.100.00-КТН-036–13. Правила технического диагностирования механо-технологического оборудования. ОАО «АК «Транснефть», 2013.
2. Дубов А.А., Дубов Ал.А., Колокольников С.М. Метод магнитной памяти металла и приборы контроля: Учебное пособие. 5-е изд. М.: Издательский дом «Спектр», 2012. 395 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ЗОН КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ИЗДЕЛИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ – НЕДОСТАЮЩЕЕ ЗВЕНО В СИСТЕМЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Дубов А.А.

ООО «Энергодиагностика», Москва, Россия

Известно, что основными источниками повреждений при эксплуатации изделий машиностроения являются локальные зоны концентрации на-

пряжений (ЗКН), которые образуются под действием рабочих нагрузок, в первую очередь, на дефектах металлургического и технологического происхождения.

Металлургические и технологические дефекты изготовления, как известно, создают в локальных зонах изделия высокий уровень остаточных напряжений (ОН). Контроль ОН на отдельных производствах изделий выполняется выборочно. При этом контролируется средний (объемный) уровень ОН, а локальные зоны ОН от внутренних дефектов металла, как правило, не контролируются и пропускаются. Кроме того, неизвестно, где эти локальные зоны расположены и как их можно обнаружить?

Таким образом, приходится констатировать, что отсутствие контроля ОН с целью определения концентрации напряжений на дефектах структуры изделий, как на заводах-изготовителях, так и в эксплуатации, является недостающим звеном в системе НК изделий, что значительно снижает их надежность.

В докладе рассматриваются возможности метода магнитной памяти металла при диагностике новых изделий и бывших в эксплуатации для определения локальных ЗКН – источников развития повреждений.

ВНУТРИТРУБНАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ ТРУБОПРОВОДОВ С ГЛАДКОСТНЫМ ПОКРЫТИЕМ

Коваленко А.Н.

В докладе рассматриваются принципы построения дефектоскопов нового поколения с бесконтактной системой намагничивания для контроля трубопроводов с гладкостным покрытием, с толщиной стенки до 41 мм и с рабочим давлением до 25 МПа.

ВЛИЯНИЯ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ РАСТЯЖЕНИЕМ (СЖАТИЕМ), КРУЧЕНИЕМ И ГИДРОСТАТИЧЕСКИМ ДАВЛЕНИЕМ НА МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРУБНОЙ СТАЛИ

Мушников А.Н., Задворкин С.М., Смирнов С.В., Якушенко Е.И.

Изучено влияние упругой деформации растяжением/сжатием, кручением, внутренним давлением и их комбинациями на магнитные характеристики конструкционной стали контролируемой прокатки группы прочности Х70. При комбинировании растяжения/сжатия с кручением действие касательных напряжений ослабляет влияние нормальных напряжений на магнитные характеристики. В случае комбинации всех трех видов нагружения увеличение внутреннего давления приводит к росту коэрцитивной силы, снижению остаточной индукции и максимальной магнитной проницаемо-

сти. При этом характер зависимостей магнитных характеристик от комбинации двух других видов нагружения не меняется. По результатам измерений построена зависимость интенсивности напряжений от коэрцитивной силы при различных значениях параметра Лодэ, который характеризует вид напряженного состояния объекта.

ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ НА ПРОЦЕССЫ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ В ПРИСУТСТВИИ ДВУХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ОДНОРОДНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Ничипурук А.П., Огнева М.С., Сташков А.Н.
*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Ордена Трудового Красного Знамени Институт физики металлов
Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН),
г. Екатеринбург, Россия*

Исследование поведения магнитных свойств сталей, подверженных пластической деформации, ведется давно и является актуальной задачей. В недавних исследованиях [1 – 3] показано, что основную роль в появлении перегиба на петлях гистерезиса деформированной низкоуглеродистой стали играют остаточные механически напряжения. В предыдущей работе [4] было определено, что наибольшую чувствительность к величине деформации имеет величина критического поля смещения 90-градусных доменных границ.

Для развития магнитных методов неразрушающего контроля действующих и остаточных напряжений важным вопросом является раздельная оценка вкладов в процессы перемагничивания 180- и 90-градусных доменных границ. В настоящее время надежных экспериментальных методов определения этих параметров авторам не известно.

Данная работа направлена на развитие методов, позволяющих приблизиться к экспериментальному определению параметров оценки вызванной растягивающими нагрузками пластической деформации в сталях. Нами была исследована анизотропия магнитных свойств при намагничивании предварительно деформированных образцов из низкоуглеродистой стали.

Исследования проводились на цилиндрических образцах выполненных из низкоуглеродистой стали Ст.1кп, диаметр которых составляет $(3,84 \pm 0,03)$ мм, длина 250 мм (табл. 1).

Таблица 1

Марка стали	Массовая доля элементов, %		
	углерода	марганца	кремния
Ст.1кп	0,06...0,12	0,25...0,50	< 0,05

При предварительной подготовке образцов был выполнен отжиг при температуре 650 °С в течении 1,5 ч. Измерение коэрцитивной силы магнитометрическим методом после отжига позволило считать, что исходное состояние образцов одинаковое. После термообработки образцы были подвергнуты деформации растяжением.

Измерения проводились на четырех образцах с относительным удлинением 0; 2,1; 4,3 и 6,1%.

Значения коэрцитивной силы деформированных образцов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Образец, №	1 (0%)	2 (2,1%)	3 (4,3%)	4 (6,1%)
H_c , А/см	2,44	3,77	4,90	5,57

Измерение магнитных свойств стали проводились на установке, структурная схема которой приведена на рис. 1. Ток синусоидальной формы частотой 30 Гц и амплитудой 2,3 А протекает через образец, что создает на его поверхности циркулярное магнитное поле амплитудой 2 А/см. Поляризуемое магнитное поле, создаваемое в направлении перпендикулярно циркулярному варьировалось в ходе эксперимента от 0 до 60 А/см с шагом 1 А/см. Ток через образец задавался с помощью генератора Agilent 33220А.

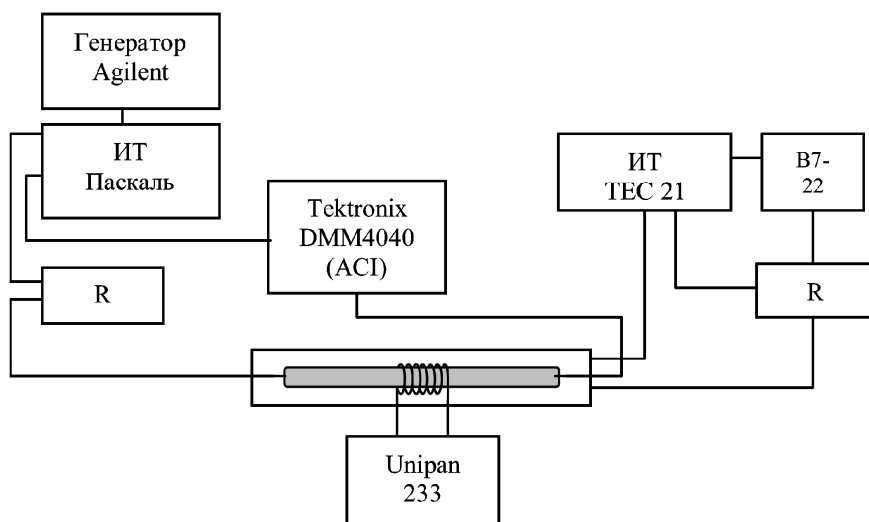


Рис. 1. Структурная схема измерительной установки

Сигнал с измерительной катушки фиксировался с помощью селективного нановольтметра Unipan 233.

Особенность данной схемы измерения заключается в том, что сигнал селективного вольтметра, учитывая осевое расположение измерительной катушки возможен только при некоторой поляризации намагниченности образца, создаваемой полем соленоида.

В ходе эксперимента измеряли сигнал с селективного нановольтметра при изменении поля в соленоиде от 0 до 60 А/см («кривая намагничивания»), от 60 до -60 А/см («спинка петли гистерезиса»).

На рисунке 2 представлена зависимость величины сигнала с измерительной катушки от величины поля создаваемого соленоидом. Отличительной особенностью данных результатов является наличие явно выраженных максимумов в полях, близких к «критическим» при необратимых смещениях 90-градусных доменных границ. Причем эти поля, в силу вполне понятных закономерностей, смещаются в сторону больших величин при увеличении степени пластической деформации исследованных образцов.

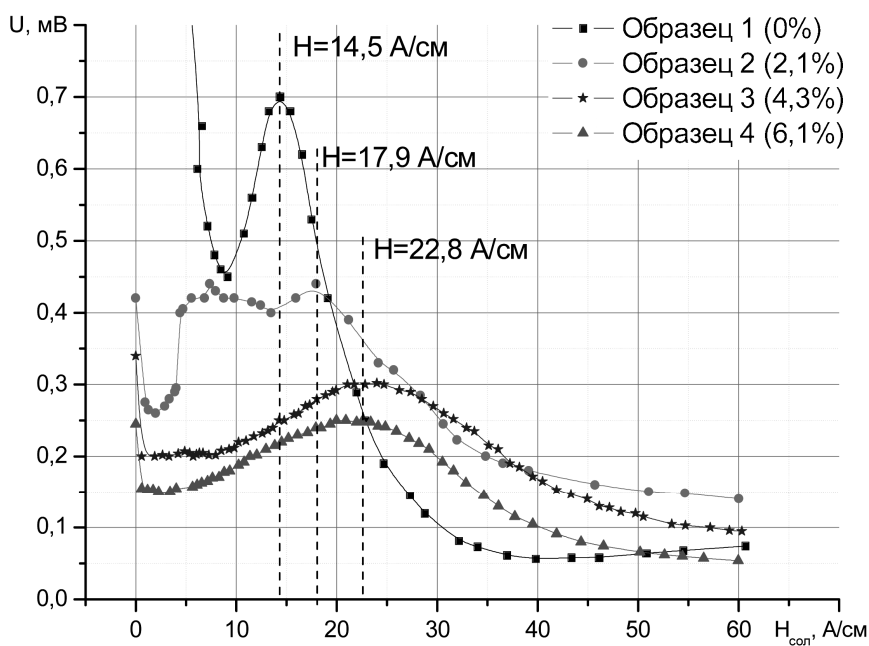


Рис. 2. Зависимость показаний селективного вольтметра от поляризирующего поля для различных степеней пластической деформации

Литература

1. **Stefania C.G., Atherton D.L. and Clapham L.** Plastic Versus Elastic Deformation Effects on Magnetic Barkhausen Noise in Steel. *Acta Mater.*, 2000. V. 48. P. 3545 – 3551.
2. **Bulte D.P., Langman R.A.** Origins of the Magnetomechanical Effect. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2002. V. 251. P. 229 – 243.
3. **Кулеев В.Г., Царькова Т.П., Ничипурук А.П.** Влияние растягивающих пластических деформаций на остаточную намагниченность и начальную магнитную проницаемость малоуглеродистых сталей // *Дефектоскопия*. 2006. № 4. С. 61 – 74.
4. **Ничипурук А.П., Сташков А.Н., Костин В.Н., Корх М.К.** Возможности магнитного контроля предшествующих разрыву пластических деформаций в конструкциях из низкоуглеродистых сталей // *Дефектоскопия*. 2009. № 9. С. 31 – 38.

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Путилова Е.А., Задворкин С.М.
Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Сложные климатические условия эксплуатации, напряжения и деформации, возникающие на всех стадиях технологического процесса при изготовлении магистральных трубопроводов, приводят к необходимости создания и развития современных методов диагностики текущего состояния труб с целью оценки их долговечности и надежности. На основании экспериментально установленных различий в структуре и уровне физико-механических свойств основного металла, материала шва и околошовной зоны сварных соединений трубных сталей, сварное соединение в магнитном отношении можно рассматривать как многослойный материал, что позволяет применять при диагностике подходы, разработанные для подобных материалов. В частности по значениям напряженности магнитного поля, при которых формируются максимумы на полевой зависимости дифференциальной магнитной проницаемости, можно оценивать структурное состояние сварных соединений с целью диагностики отклонения от требуемого состояния и выявления наиболее опасных, с точки зрения возможности протекания хрупкого разрушения, зон сварного соединения. Установлено снижение чувствительности магнитных характеристик к приложенным касательным напряжениям по сравнению с нормальными напряжениями. При уровне нормальных напряжений от –200 до 200 МПа, более чем в десять раз превышающих рабочее давление в трубопроводе, коэрцитивная сила, остаточная индукция и максимальная магнитная проницаемость ведут себя однозначно, что позволяет использовать их в качестве параметров для оценки текущего состояния отдельных зон сварных соединений труб большого диаметра.

**ЛОКАЛЬНЫЙ МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССОВ
ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В МАТЕРИАЛАХ
ОТВЕТСТВЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ НИКЕЛЕВЫХ
СУПЕРСПЛАВОВ ПРИ УПРУГО ПЛАСТИЧЕСКОМ
ДЕФОРМИРОВАНИИ**

Ригмант М.Б., Степанова Н.Н., Виноградова Н.И., Казанцева Н.В.
*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Ордена Трудового Красного Знамени Институт физики металлов
Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН)
г. Екатеринбург, Россия*

Как известно, никелевые суперсплавы имеют широкое промышленное применение для изготовления лопаток газовых турбин, турбин ТЭЦ или турбин самолетов. Прочностные свойства таких ответственных изделий в условиях высоких температур (600...900 °С) и больших механических напряжениях обусловлены наличием в никелевом сплаве интерметаллида Ni₃Al (γ' -фаза). По магнитным свойствам материал никелевых суперсплавов является парамагнитным, с относительной магнитной проницаемостью μ менее 1,005. Однако, в процессе эксплуатации, локальная пластическая деформация может оказывать сильное влияние не только на прочностные, но также и на магнитные характеристики никелевых суперсплавов. Ранее авторами было показано, на примере изделий (лопатки турбин Якутской ГРЭС) из никелевого сплава ЧС-70, что при работе в экстремальных условиях, которые привели к развалу изделия, в районе трещины, а именно, в пере лопатки турбины магнитная восприимчивость $\chi = \mu - 1$ выросла почти на два порядка [1]. Открытым оставались вопросы – какая деформация ответственна за зарождение и развитие трещины, и в какой именно фазе, в Ni или в Ni₃Al, образовалась эта трещина.

Для решения этих вопросов нами были проведены исследования на монокристаллах никелевых суперсплавов типа ВКНА-4У (90% γ' -фазы) и ЭИ-437-Б (9% γ' -фазы) с ориентацией [001], а так же поликристаллических образцах сплава ЭП-800 (40% γ' -фазы). Образцы суперсплава ЭИ-437-Б деформировали прокаткой при комнатной температуре. Для деформации образцов суперсплава ВКНА-4У применяли метод ударно-волнового нагружения. Результаты исследований показали, что магнитная восприимчивость χ существенно зависит от вида и величины нагрузок (деформаций), и может быть использована для оценки характера и амплитуды воздействия [2].

Для ответа на второй вопрос – в какой фазе, в Ni или в Ni₃Al, образовалась трещина и происходило развитие этой трещины, авторами был выращен монокристалл Ni₃Al. После этого, из полученного монокристалла был вырезан образец для испытаний на растяжения и проведены сами испытания на разрывной установке. Измерения магнитной восприимчивости χ прибором ИМПАС-1 показали, что существенное увеличение χ произошло

только в зоне разрыва образца, а именно вблизи шейки разрыва. Из этой зоны были вырезаны образцы, на которых были проведены измерения магнитных свойств на вибрационном магнитометре в магнитных полях до 17 кЭ. Измерения показали наличие слабо выраженной петли магнитного гистерезиса с насыщением в поле 2,8 кЭ, а так же наличие остаточной намагниченности и коэрцитивной силы порядка 10...12 Э.

Данные исследования убедительно показали, что в изделиях из никелевых суперсплавов, работающих в экстремальных условиях зарождение и развитие трещин происходит не в сравнительно пластичном Ni, а, исключительно, в упрочняющем интерметаллиде Ni₃Al. За появление и развитие трещин ответственны одноосные напряжения (деформации) растяжения-сжатия. Локальные измерения магнитных свойств, а именно, значения магнитной восприимчивости χ могут служить параметрами диагностирования мест повышенных деформаций, где могут происходить процессы, приводящие к зарождению и развитию трещин.

Литература

1. Казанцева Н.В., Пилюгин В.П., Завалишин В.А., Ригмант М.Б., Давыдов Д.И., Степанова Н.Н. Влияние деформации на магнитные свойства сплавов на основе Ni₃Al // Письма о материалах. 2013. Т. 3. С. 16 – 19.
2. Казанцева Н.В., Королев А.В., Давыдов Д.И., Ригмант М.Б., Виноградова Н.И. Концентрационная неоднородность и магнетизм в лопатке из жаропрочного никелевого сплава // Материаловедение. 2013. № 4. С. 18 – 24.

АНАЛИЗ ДИАПАЗОНА ВОЗМОЖНОГО ИЗМЕНЕНИЯ РЕЛАКСАЦИОННОЙ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ СТАЛИ И ОЦЕНКА ЕЕ ВЕРОЯТНОГО ЗНАЧЕНИЯ

Сандомирский С.Г.
ОИМ НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Доклад посвящен методике выбора напряженности размагничивающего поля для снижения остаточной намагниченности стали после магнитной дефектоскопии и структуроскопии.

Релаксационная коэрцитивная сила H_r – напряженность магнитного поля, необходимого для приведения магнитного материала с остаточной намагниченностью M_r в статически размагниченное состояние – важный магнитный параметр сталей (наряду с их намагниченностью M_s технического насыщения, коэрцитивной силой H_c и M_r). Знание H_r важно при размагничивании сталей и изделий из них в электротехнике и после магнитного контроля. Применение размагничивающих полей с напряженностью,

отличной от H_r , приводит к недопустимой остаточной намагниченности материала (например, материала трубопровода). Несмотря на важность знания H_r , методика ее измерения не регламентирована [1]. Трудоемкость измерения привела к тому, что H_r измерена на ограниченном количестве материалов [2]. Ее значения не приводятся в справочной литературе [3].

Оценки относительной погрешности δ измерения H_r позволили получить $\delta = \pm 10\%$. Для многих сталей разница между H_c и H_r невелика и столь высокая δ измерения H_r не удовлетворяет потребностям практики. Хотя H_r коррелирует с H_c материала, считать $H_r \approx H_c$ [2], неприемлемо.

Задача определения связи H_r сталей с их H_c , M_s и M_r решена в [4, 5]. Разработанная и экспериментально обоснованная там формула для расчета H_r при $0,2 \leq K_{II} = M_r/M_s \leq 1$ имеет вид:

$$H_r \approx H_c [1 + 0,64(1 - K_{II})^2]. \quad (1)$$

Но параметры M_s и M_r стали, необходимые для вычисления K_{II} и H_r по (1), известны не всегда. Это связано с тем, что единственным магнитным параметром материала, измерение которого допускается в открытой магнитной цепи, является H_c [1]. Измерения M_s и M_r необходимо проводить в замкнутой магнитной цепи на образцах специальных форм. Это не всегда можно осуществить.

Актуальна задача оценки возможного диапазона изменения и вероятного значения H_r стали с известной H_c и не известными M_s и M_r . Для ее решения формула (1) скорректирована по результату статистического анализа сопоставления результатов расчета и измерения H_r сталей с известными H_c , M_r и M_s [6]. При этом использованы результаты измерения в [3] релаксационной намагниченности M_{Hr} и релаксационной магнитной восприимчивости χ_r сталей 30, 45, 38ХГН, 40Х и 50ХНМ, прошедших разные термические обработки. Используются результаты измерения M_{Hr} , χ_r , H_c , M_s и M_r 83 разных материалов, представленных в табл. 1.1, 3.1, 21.1, 21.2, 26.2 и 35.2 справочника [3]. Данные о H_r сталей получены по формуле, записанной на основании определения в [3] параметра χ_r :

$$H_r = M_{Hr} / \chi_r. \quad (2)$$

Оптимальные статистические результаты (коэффициент корреляции $R = 0,9942$ при средне квадратичном отклонении $\sigma = 93,4$ А/м) получены при расчете H_r по формуле

$$H_r \approx H_c [1 + 0,54(1 - K_{II})^2]. \quad (3)$$

Разница в расчете H_r по формулам (3) и (1) для конкретных сталей по результатам измерения их H_c , M_r и M_s составляет около 1%. Это на порядок меньше $\delta = \pm 10\%$ измерения H_r , меньше $\delta = \pm 2\%$ измерения H_c и сопоста-

вимо с $\delta = \pm 1\%$ измерения $K_{II} = M_r/M_s$. Тем не менее, учитывая не большую разницу между значениями H_r и H_c многих сталей, для практического использования в расчете H_r автор рекомендует формулу (3), полученную корректировкой формулы (1) по результатам статистической обработки данных результатов расчета и измерения H_r .

Для решения поставленной задачи важен анализ не самой величины H_r , а относительного значения ψ разницы между H_r и H_c :

$$\psi = (H_r - H_c)/H_c \approx 0,54(1 - K_{II})^2. \quad (4)$$

Для определения возможного диапазона изменения H_r сталей с известной H_c в [6] проведен анализ диапазона изменения K_{II} сталей. Используются 593 результата измерения M_r , M_s и H_c сталей 30, 45, 27СГ, 10ХСНД, 15ХН5МФ, 25Х1МФ, 30ХГСА, 30ХГСНА, 30ХМА, 38ХГН, 38ХМЮА, 38ХС, 40Х, 45Х, 40Х1НВА, 50ХНМ, 50ХН1М, 40Х10С2М, 12Х2Н4А, 18Х2Н4ВА, 18Х2Н4ВА цементированной, 18ХГТ, 30ХН3А, 30ХМА, 60С2, 65Г, У7А, У10А, 95Х18 и 9ХГВ после разных режимов отпуска и закалки, а также отожженных углеродистых сталей. По диапазону изменения: $200 \text{ кА/м} \leq M_r \leq 1400 \text{ кА/м}$, $500 \text{ кА/м} \leq M_s \leq 1707 \text{ кА/м}$ и $71 \text{ А/м} \leq H_c \leq 7,43 \text{ кА/м}$ проанализированные материалы охватывают практически весь диапазон изменения магнитных свойств сталей.

Анализ зависимости $K_{II}(H_c)$ показал, что при $H_c \leq 2000 \text{ А/м}$ практически все K_{II} сталей заключены в диапазоне ($\gamma = 1 \text{ м/А}$ – множитель, определяемый размерностью H_c):

$$0,5(1 - 10^{-4} \gamma H_c) \leq K_{II} \leq 0,8, \quad (5)$$

а при $H_c \geq 2000 \text{ А/м}$ практически все K_{II} сталей заключены в диапазоне:

$$0,4 \leq K_{II} \leq (0,92 - 0,6 \cdot 10^{-4} \gamma H_c). \quad (6)$$

На рисунке 1 представлены результаты расчета по (4) диапазона изменения параметра ψ сталей с различными H_c , полученные с учетом возможного диапазона (5) и (6) изменения K_{II} .

Возможные значения параметра ψ стали с заданной H_c заключены между сплошными линиями на рисунке. Пунктиром изображена прямая $\psi(H_c)$, близкая к среднему значению возможного диапазона изменения параметра ψ для любого значения H_c стали. Ее уравнение имеет вид:

$$\psi(H_c) = 1,287 \cdot 10^{-5} \gamma H_c + 0,076. \quad (7)$$

Из (4) и (7) получим формулу для расчета среднего значения \bar{H}_r возможного диапазона изменения H_r стали с известной H_c :

$$\bar{H}_r(H_c) \approx H_c(1,076 + 1,287 \cdot 10^{-5} \gamma H_c). \quad (8)$$

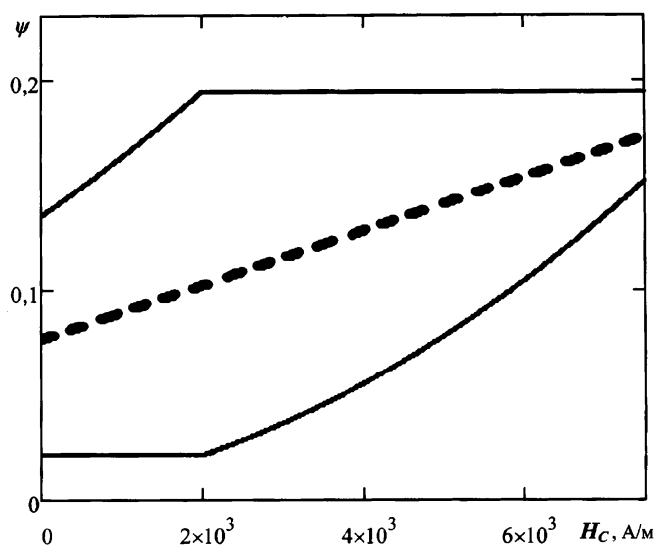


Рис. 1. Результаты расчета по (4) диапазона изменения параметра ψ сталей с разными H_c

Рассчитанные по (8) значения \bar{H}_r могут быть использованы для размагничивания сталей, H_c которых известна, а параметр K_D не известен. Размагничивающее поле напряженностью $-\bar{H}_r$ обеспечит в этом случае статистически минимальную остаточную намагниченность стали после размагничивания (что подтверждено практическими примерами).

Литература

1. ГОСТ 8.377–80. Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик. М.: Издательство стандартов, 1986. 21 с.
2. Бида Г.В., Ничипурук А.П. Многопараметровые методы в магнитной структурографии и неразрушающем контроле механических свойств сталей // Дефектоскопия. 2007. № 8. С. 3 – 24.
3. Бида Г.В., Ничипурук А.П. Магнитные свойства термообработанных сталей. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 218 с.
4. Сандомирский С.Г. Расчет релаксационной коэрцитивной силы ферромагнитного материала // Электричество. 2010. № 7. С. 55 – 58.
5. Сандомирский С.Г. Расчет и анализ релаксационных магнитных параметров сталей. Palmarium Academic Publishing, Saarbrücken, Germany, 2012. 100 с.
6. Сандомирский С.Г. Анализ диапазона изменения релаксационной коэрцитивной силы сталей // Сталь. 2013. № 2. С. 47 – 51.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ МАГНИТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ СТАЛЕЙ В МАГНИТНОМ СТРУКТУРНОМ АНАЛИЗЕ И КОНТРОЛЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Сандомирский С.Г.
ОИМ НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Доклад посвящен определению взаимосвязей между магнитными параметрами сталей и их использованию в магнитном структурном анализе и при контроле напряженного состояния.

Основными параметрами сталей, результаты прямого или косвенного измерения которых рекомендуются к использованию в магнитном структурном и фазовом анализе, являются остаточная намагниченность M_r , коэрцитивная сила H_c , и намагниченность M_s технического насыщения.

Многообразие задач контроля определило использование и других параметров. К часто используемым магнитным параметрам относятся начальная μ_n и максимальная μ_m магнитные проницаемости, поле H_{μ_m} , при котором магнитная проницаемость максимальна, релаксационные магнитные параметры (РМП) сталей и изделий из них (релаксационная коэрцитивная сила H_{re} тела, релаксационная намагниченность M_{Hr} и восприимчивость χ_r , намагниченность M_{rC} «коэрцитивного возврата», «вторичная» остаточная намагниченность M_{rH} материала и M_{rHe} тела). Исследователи заметили: чувствительности μ_n , μ_m , H_{μ_m} , H_{re} , M_{Hr} , χ_r , M_{rC} , M_{rH} и M_{rHe} к изменениям технологических факторов отличаются от чувствительностей к ним H_c , M_r и M_s .

Физический смысл связей μ_n , μ_m , H_{μ_m} , H_{re} , M_{Hr} , χ_r , M_{rC} , M_{rH} и M_{rHe} сталей с их H_c , M_r и M_s в том, что при структурных изменениях в сталях изменения их магнитных свойств на начальной и основной кривых намагничивания и предельной петле гистерезиса происходят взаимосвязано.

Например, общепризнанна эмпирическая формула Гумлиха и Шмидта для оценки μ_m сталей по H_c и M_r . В системе СИ она может быть записана в виде ($\tau = 1$ м/кА):

$$\mu_m \approx (0,476 + 0,072\tau H_c) M_r / H_c. \quad (1)$$

В [1] формула (1) скорректирована по результатам статистического анализа взаимосвязей между магнитными параметрами 855 сталей во всем диапазоне изменения их H_c , M_r и M_s :

$$\mu_m \approx [0,5 + 0,06\tau H_c - (0,068\tau H_c)^2] M_r / H_c. \quad (2)$$

В результате средняя относительная погрешность δ расчета μ_m снижена в 1,5 раза до $\delta \approx 9,36\%$.

Связь всех РМП сталей с их H_c , M_r и M_s установлена автором в ряде работ, обобщенных в [2, 3]. Показано, что физическая природа особенностей структурной и фазовой чувствительности РМП сталей связана только с особенностями изменения их M_r , M_s и H_c . Определены условия высокой чувствительности РМП к изменениям структурного состояния и фазового состава стали.

В [4, 5] разработаны формулы для оценки μ_n сталей по результатам измерения H_c , M_r и μ_m :

$$\mu_n \approx 1 + 150,7 / [1 + 0,5(\tau H_c)^{1,5}]; \quad (3)$$

$$\mu_n \approx \mu_m [2,9 + 31,5(e^{-1,75\tau H_c})]^{-1}. \quad (4)$$

Для исключения μ_m из формулы (4) в [5] использована формула (1). Из (1) и (4) в [5] получена формула для оценки μ_n сталей по H_c и M_r :

$$\mu_n \approx [(0,476 + 0,072\tau H_c)M_r] / [(2,9 + 35e^{-1,75\tau H_c})H_c]. \quad (5)$$

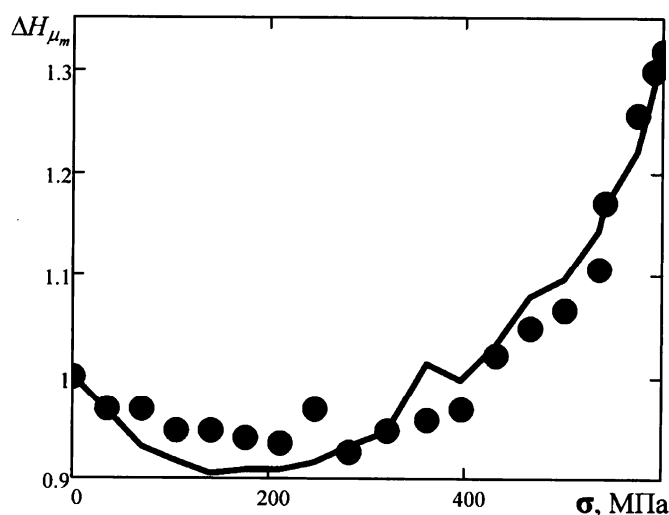
В [6] разработана формула для расчета поля H_{μ_m} по H_c и $K_{II} = M_r/M_s$:

$$H_{\mu_m} \approx H_c [1,48 - 0,17K_{II}^3 - (0,07 - 0,06K_{II}^3)\tau H_c] / \sqrt{K_{II}}. \quad (6)$$

Результаты расчета по формулам (2), (5), (6) могут быть использованы в магнитном структурном анализе сталей взамен трудоемкого измерения μ_n , μ_m и H_{μ_m} .

Необходимость контроля состояния конструкций активировала поиск связей параметров напряженно-деформированного состояния с магнитными свойствами сталей. При этом измеряют те же параметры H_c , M_r , M_s , μ_n , μ_m и H_{μ_m} , что и в магнитном структурном анализе. Но измерение μ_n , μ_m и H_{μ_m} не производительны и не точно. В [7] показано, что механические напряжения не изменяют связи между H_c , M_r и μ_m сталей, имеющей место для материала в ненапряженном состоянии. Предложена методика определения соотношения этих характеристик для сталей в напряженном состоянии по результатам измерения магнитных параметров материала в ненапряженном состоянии.

В настоящем докладе показано, что механические напряжения не изменяют и характера связи μ_n и H_{μ_m} с магнитными параметрами предельной петли гистерезиса сталей, имеющей место для материала в ненапряженном состоянии. Например, неизменность связи между H_{μ_m} и H_c , M_r , M стали



**Рис. 1. Относительное изменение ΔH_{μ_m} поля H_{μ_m} материала околшовной зоны стали 70 от приложенных напряжений σ :
 ● – экспериментальные результаты по [8]; линия – расчет по (6)**

при приложении к ней напряжений подтверждают представленные на рисунке результаты сопоставления рассчитанного по (6) и экспериментально измеренного в [8] относительного измерения ΔH_{μ_m} поля H_{μ_m} материала околшовной зоны трубной стали 70. Для расчета по (6) использованы результаты измерения H_c , M_r и M_s материала, представленные в [8].

Полученный результат позволяет рекомендовать использование формулы (6) для расчета H_{μ_m} материала, подвергнутого нагружению или пластической деформации, по результату измерения его H_c , M_r и H_{μ_m} в исходном состоянии и параметров H_c и M_r в напряженно-деформированном состоянии. Это позволяет отказаться от проведения сложных измерений H_{μ_m} сталей под нагрузкой.

Литература

1. Сандомирский С.Г. Структурная чувствительность максимальной магнитной проницаемости μ_m . 1. Статистический анализ связи μ_m сталей с параметрами петли гистерезиса // Контроль. Диагностика. 2013. № 12. С. 33 – 38.

2. **Сандомирский С.Г.** Расчет и анализ релаксационных магнитных параметров сталей. Palmarium Academic Publishing, Saarbrucken, Germany, 2012. 100 с.

3. **Сандомирский С.Г.** Возможности и ограничения использования измерений релаксационных магнитных параметров сталей в магнитном структурном анализе (обзор) // В мире неразрушающего контроля. 2013. № 4.

4. **Сандомирский С.Г.** Статистический анализ взаимосвязи между магнитной проницаемостью и коэрцитивной силой сталей // Электричество. 2010. № 12. С. 60 – 63.

5. **Сандомирский С.Г.** Оценка начальной магнитной проницаемости сталей по коэрцитивной силе и остаточной намагниченности // Сталь. 2011. № 9. С. 57 – 60.

6. **Сандомирский С.Г.** Оценочный расчет магнитного поля, при котором магнитная проницаемость сталей достигает максимума // Электричество. 2012. № 7. С. 63 – 68.

7. **Сандомирский С.Г.** Анализ взаимосвязи между магнитными параметрами сталей в напряженно-деформированном состоянии // Деформация и разрушение материалов. 2012. № 4. С. 13 – 17.

8. **Туева Е.А., Митропольская С.Ю., Шершнева Л.С.** Магнитный контроль высокопрочных низколегированных сталей для магистральных трубопроводов // VI Российская НТК «Механика микронеоднородных материалов и разрушение МММР 2010». Екатеринбург. 2010. Тезисы № 33.

АНАЛИЗ НАМАГНИЧИВАНИЯ ЧУГУНОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ ВНУТРЕННЕГО КОЭФФИЦИЕНТА РАЗМАГНИЧИВАНИЯ ГРАФИТОВЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Сандомирский С.Г.
ОИМ НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Доклад посвящен количественной оценке изменений соотношения между магнитными параметрами чугунов, обусловленных влиянием графитовых включений разной формы, по сравнению с такими соотношениями для сталей. Анализу возможности сортировки чугунов с разной структурой друг от друга и от сталей по результатам магнитных измерений.

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. В магнитной структуроскопии

распространены методы, основанные на измерении 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]. Анализом намагничивания чугуна как однородно намагничиваемого тела с размагничивающим фактором $N_{\text{вн}}$ показано, 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 намагниченность стали с той же M_s . Этот результат можно использовать для отсортировки чугунных изделий с разной формой графитовых включений от сталей и друг от друга.

Та же методика использована для аналитического описания связи максимальной магнитной проницаемости μ_{m} чугунов с их H_c , анализа отличий этой связи для сталей и чугунов, оценки значений μ_{m} 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]:

$$\mu_{\text{m}}(H_c) \approx 1 + 35\,000 e^{-4H_c^{0,285}} \quad (1)$$

(коэффициент корреляции R в линейном уравнении регрессии между результатами расчета по (1) и эксперимента составил $R \approx 0,976$, а δ расчета для многих сталей не превысила $\pm 20\%$), то для чугунов эта зависимость имеет вид:

$$\mu_{\text{m}}(H_c) \approx \frac{\mu_{\text{m}}(H_c)}{1+k}, \quad (2)$$

где k – коэффициент, зависящий от формы и объема графитовых включений.

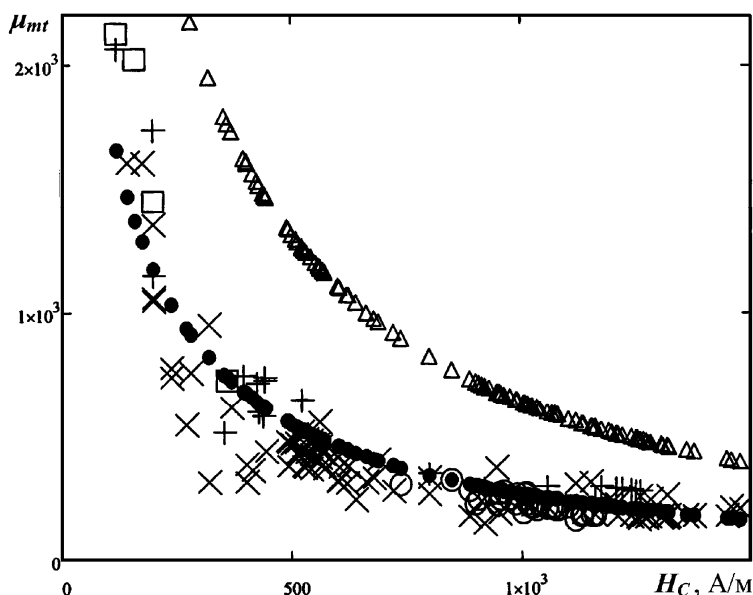


Рис. 1. Зависимость максимальной магнитной проницаемости μ_{mt} чугунов от их H_c :

x, +, □ и ○ – экспериментальные результаты соответственно для серого, высокопрочного, ковкого и белого чугунов;
 Δ и ● – результаты расчета μ_{mt} по формулам (1) и (2) при $k = 1,37$

На рисунке 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 $120 \text{ A/m} \leq H_c \leq 6078 \text{ A/m}$ (исследованные чугуны охватывают практически весь возможный для чугунов интервал изменения H_c и μ_{mt}). На рисунке 1 для наглядности представлены результаты для чугунов с $H_c \leq 1,5 \text{ кА/м}$. Значение $k = 1,37$ обеспечивает наименьшее среднеквадратичное отклонение между результатами расчета по (2) и эксперимента. Полученные 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 $\mu_{mt}(\text{расчет}) = \mu_{mt}(\text{эксперимент})$ составил 0,926. Средняя квадратическая ошибка расчета по (2) при $k = 1,37$ составила $\sigma \approx 130$.

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 всего 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, $N_{\text{вн}}$ чугунов в их магнитном состоянии, соответствующем области максимальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{mт}}$ на основной кривой намагничивания, может быть оценен величиной

$$N_{\text{вн}} \approx k / [(1 + k)\mu_{\text{mт}}]. \quad (3)$$

Анализ различия в значениях коэффициента k при расчете $\mu_{\text{mт}}$ по (2) для чугунов с различной формой графитовых включений не выявил статистически значимого различия в значениях $k \approx 1,71$ при раздельном анализе зависимостей $\mu_{\text{mт}}(H_c)$ для белого (с преобладанием углерода в связанном состоянии) и серого (с пластинчатой формой графитовых включений) чугунов. Но для чугунов с компактной формой графитовых включений (для высокопрочного и ковкого чугунов) значения k существенно ниже и составляют соответственно 1,02 и 0,83. Этот результат так же может быть использован для разработки методов отсортировки чугуновых изделий с различной формой графитовых включений не только от сталей, но и друг от друга. Так, среднее значение произведения $\mu_{\text{mт}}H_c$ (кА/м) для 117 чугунов с пластинчатой формой включений составило 265 при $\sigma = 89$. Для 48 чугунов со сферической формой включений среднее значение произведения $\mu_{\text{mт}}H_c$ (кА/м) составило 351,5 при $\sigma = 115$. Отметим, что для 313 различных сталей, использованных для анализа взаимосвязи $\mu_{\text{mт}}$ и H_c в [3], среднее значение произведения $\mu_{\text{mт}}H_c$ (кА/м) составило 526,4 при $\sigma = 132$.

Литература

1. **Сандомирский С.Г.** Оценка внутреннего коэффициента размагничивания чугунов по результатам измерения их остаточной намагниченности // *Металлы*. 2013. № 3. С. 88 – 94.
2. **Сандомирский С.Г.** Оценка максимальной магнитной проницаемости чугунов по коэрцитивной силе // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2012. Т. 78, № 12. С. 39 – 44.
3. **Сандомирский С.Г.** Оценка максимальной магнитной проницаемости сталей по коэрцитивной силе // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2011. Т. 77, № 3. С. 35 – 38.

МОНИТОРИНГ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ ПОДЪЕМНЫХ МАШИН: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

Слесарев Д.А., Шпаков И.И.
ООО «ИНТРОН-ПЛЮС», Москва, Россия

Неразрушающий контроль канатов является одним из важнейших механизмов обеспечения безопасности эксплуатации подъемных машин и

при этом позволяет предотвратить экономические потери вследствие возможных аварийных ситуаций. Эффективность неразрушающего контроля определяется регулярностью проводимых обследований в течение всего жизненного цикла каната. Широкое применение неразрушающего контроля ограничивается в первую очередь тем, что далеко не на всех предприятиях, эксплуатирующих подъемные машины, есть возможность иметь свой специально подготовленный персонал и оборудование. Примером этому являются буровые установки, расположенные зачастую в труднодоступных районах. Регулярное привлечение сторонних инспектирующих организаций также бывает затруднено и связано с необходимостью прерывать технологический процесс, что приводит к дополнительным экономическим потерям. В этой связи возникает потребность разработки оборудования, обеспечивающего автономный мониторинг технического состояния канатов.

Система для автономного мониторинга канатов должна обеспечивать высокую надежность своей работы и быть простой в обслуживании, не требовать специальной квалификации от персонала. Она должна быть рассчитана на постоянную установку на объекте. Такие требования являются в определенной мере противоречивыми. С одной стороны для обеспечения надежности нужно снизить механическое воздействие контролируемого объекта – каната – на измерительную систему, с другой стороны – сохранить достаточную чувствительность измерительной системы и низкий уровень мешающих факторов для обеспечения достаточной достоверности результатов контроля. Известный предлагаемый путь решения этой задачи – значительное увеличение диаметра проходного отверстия [1]. По этому принципу сконструирован датчик (магнитная головка) компании Ansys (ЮАР) системы непрерывного мониторинга шахтных канатов. Ограничение этого подхода заключается в том, что, несмотря на большой проходной диаметр, магнитная головка должна быть расположена в месте наименьших поперечных перемещений каната, которое может не обеспечивать контроля всей длины каната и его участков, наиболее подверженных износу. Другой подход к решению этой задачи реализован в автоматизированном дефектоскопе для мониторинга стальных канатов ИНТРОС-АВТО компании «ИНТРОН-ПЛЮС»: магнитная головка не находится постоянно на канате, но располагается вблизи него и устанавливается на канат только на время проведения ежесменного контроля, при этом операции установки и снятия ее на канат занимают всего несколько минут. Магнитная головка постоянно подключена к установленному стационарно на пульте оператора блоку управления и индикации. Ежесменный контроль каната соответствует требованиям осмотра каната перед началом смены Правил устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов [2], а магнитная дефектоскопия каната значительно повышает вероятность обнаружения дефектов по сравнению с установленным в Правилах визуальным осмотром. Ежесмен-

ный контроль проводится в одинаковых условиях (на холостом ходу каната), что позволяет сравнивать получаемые дефектограммы между собой, что в свою очередь формирует дополнительный критерий диагностики каната.

Другим противоречивым требованием к системе мониторинга является простота интерпретации результата контроля при удовлетворительной достоверности этого результата. При традиционной магнитной дефектоскопии заключение о состоянии каната дается экспертом на основании расшифровки дефектограммы. В данном случае система должна автоматически предоставить оценку состояния каната в форме, доступной для оператора подъемной машины. Решение этой проблемы возможно с применением развитых алгоритмов автоматической обработки дефектограмм с распознаванием дефектов и обеспечением возможности привлечения специалистов для дистанционного анализа в критических случаях. Результат контроля оператору буровой представляется в интуитивно понятной форме – трехцветный сигнал индикатора – красный, желтый, зеленый. Такой подход реализован в автоматическом дефектоскопе Интрос-Авто. Повышение достоверности контроля достигается путем обеспечения определенной избыточности измерительных данных. Для обеспечения возможности дополнительного детального анализа дефектограмм предусмотрено сохранение дефектоскопом результатов контроля в течение достаточно большого периода времени (1–2 месяца) и передача их на внешний компьютер.

Литература

1. **Marais J., Bester N.** A Holistic Approach to Continuous Rope Monitoring. OIPEEC Conference, 2011. P. 85.
2. **Правила** устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов, ПБ 10-382–00, Госгортехнадзор РФ, 2000.

О ВОЗМОЖНОСТЯХ МАГНИТНОЙ ДИАГНОСТИКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДВУХСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ С КОМПОНЕНТАМИ, ОБЛАДАЮЩИМИ МАГНИТОСТРИКЦИЕЙ РАЗНЫХ ЗНАКОВ

Субачев Ю.В., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М.
*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения Уральского отделения
Российской академии наук, г. Екатеринбург, Россия*

Изделия и элементы конструкций из композиционных материалов, имеющие в своем составе компоненты с различными физико-механичес-

кими свойствами, используются во многих отраслях промышленности. К ним относятся изделия с поверхностным упрочнением, сварные соединения, биметаллические изделия и прочие.

Перспективность использования магнитных методов диагностики состояния, в том числе напряженно-деформированного, композиционных материалов была показана еще в работах 40-х годов прошлого столетия. 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 композиционных материалов, а также вклада каждого компонента в его магнитные характеристики.

Различия в механических свойствах составляющих композиционных материалов под действием приложенной нагрузки приводят к различному напряженному состоянию каждого из компонентов. Когда составляющие композиционного материала представляют собой, к примеру, сплавы на основе железа (стали), возможна такая ситуация, что при одной и той же деформации магнитострикции компонентов будут иметь противоположные знаки. В такой постановке задачи вклад отдельных компонентов в магнитные свойства композиционного материала в литературе рассмотрен не был.

В докладе представлены результаты исследования закономерностей поведения ряда магнитных характеристик, в том числе магнитострикции, материалов армо-железа, магнитострикция которого в ненагруженном состоянии положительна, и никеля, магнитострикция которого отрицательна, а также модельного двухслойного материала, составленного из них, при упругом деформировании одноосным растяжением (сжатием).

Измерения магнитных характеристик проведены как в условиях замкнутой магнитной цепи, так и с применением накладных преобразователей вдоль и поперек направления приложения нагрузки. При выполнении измерений на композиционном материале приставные преобразователи и тензодатчики были размещены со стороны каждой его составляющей.

В работе сопоставлены результаты измерений гистерезисных и магнитострикционных свойств исследуемых материалов. Полученные результаты объяснены с точки зрения формирования магнитной анизотропии, наведенной действием нормальных напряжений.

Показано существенное взаимное влияние отдельных компонентов Fe-Ni двухслойного материала на деформационное поведение их магнитных характеристик, в том числе и магнитострикции.

Установлено, что для оценки напряженного состояния двухслойного материала, составляющие которого обладают магнитострикцией разных знаков, предпочтительнее использовать в качестве информативного пара-

метра среднеквадратичные значения напряжения шумов Баркгаузена, измеренные как вдоль, так и поперек направления нагружения, при этом расположение датчика должно быть со стороны слоя, обладающего отрицательной магнитострикцией.

При выполнении настоящей работы для проведения измерений магнитных и механических характеристик было использовано оборудование ЦКП «Пластометрия» при ИМАШ УрО РАН.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы Президиума РАН № 25, Программы ОЭММПУ РАН № 12-Т-1-1010, междисциплинарного проекта с ИОС УрО РАН им. И.Я. Постовского и ИПХЭТ СО РАН № 12-М-123-2045, гранта РФФИ № 13-01-00732.

ЗАЩИТА ОБЪЕКТА ПРИ МАГНИТОПОРОШКОВОМ КНТРОЛЕ

Филинов М.В.

ООО «НПК «МИКРОКОН», Москва, Россия

При проведении магнитопорошкового контроля деталь подвергается двум основным негативным воздействиям, а также различным комбинациям этих двух основных воздействий:

- коррозионному воздействию дефектоскопического материала;
- электротермическому воздействию.

До настоящего времени данные воздействия рассматривались и классифицировались мало, отражение находило лишь предупреждение об опасности формирования прижогов на поверхности изделия по причине плохого контакта.

Непосредственное коррозионное воздействие на объект контроля оказывается:

- водой при использовании магнитопорошковых суспензий на водной основе;
- галогенами, серой и их соединениями в несущих жидкостях при использовании суспензий на углеводородной основе;
- галогенами, серой и их соединениями в самих магнитопорошковых материалах.

При кажущемся безопасным с точки зрения коррозионного воздействия применении магнитопорошковых суспензий на углеводородной несущей основе есть еще скрытая опасность возникновения коррозии по причине наличия на поверхности объекта контроля влаги, запертой слоем суспензии на масляной основе.

Электротермическое воздействие на объект контроля оказывается:

- непосредственно проходящим током;
- разогревом в местах недостаточного контакта с электродами в случае намагничивания током.

Разогрев в местах недостаточного контакта может быть как по причине повышения сопротивления из-за снижения эффективного сечения контакта (к прижогам, как правило, не приводит, вызывая в основном окисление), так и по причине возникновения дуги в местах малых площадей контактов, приводящей к возникновению прижогов, становящихся.

В докладе рассматриваются особенности состава современных материалов магнитопорошкового контроля, которые помогают снижать, а в некоторых случаях – устранять коррозионное воздействие дефектоскопических материалов, включая коррозию от влаги под слоем суспензии на масляной основе; поясняются особенности выбора магнитопорошковых материалов по информации о содержании галогенов и серы в технических листах и листах безопасности материала. Также рассматриваются оборудование и техники намагничивания, безопасные с точки зрения электротермического воздействия на объект контроля.

МАГНИТНАЯ ПРЕДЫСТОРИЯ И МАГНИТОПОРОШКОВЫЙ КОНТРОЛЬ ДЕТАЛЕЙ

Шелихов Г.С., Глазков Ю.А.

Четкость индикаторных рисунков и достоверность контроля существенно зависят от *намагниченности*, правильности установки режимов намагничивания проверяемого изделия. В условиях эксплуатации намагничивают детали импульсными магнитными полями, получаемых при разряде конденсаторов, а контроль проводят способом остаточной намагниченности.

Заданную силу импульсного тока устанавливают путем проб. Если импульс тока оказывается больше заданного, то уменьшают напряжение заряда конденсаторов, пропускают ток, разряжая конденсатор. Если ток оказывается меньше заданного, то увеличивают напряжение на конденсаторе и вновь пропускают ток, разряжая конденсатор. Таким образом, пропуская ток больше и меньше заданного, добиваются нужного значения импульсного намагничивающего тока. При таком способе деталь многократно перемагничивается, при этом изменяется его магнитное состояние (магнитная предыстория), которое является в этом случае неизвестной случайной величиной. Последующее воздействие на деталь заданным полем не приводит к заданному значению магнитной индукции из-за влияния остаточной намагниченности, т.е. магнитной предыстории.

Зависимость намагниченности намагничиваемого изделия от магнитной предыстории установлена А.Г. Столетовым в 1872 г. и использована во многих фундаментальных трудах. При воздействии внешним намагничивающим полем в намагничиваемой детали происходит суперпозиция этого внешнего поля и поля, создаваемого намагниченностью (полями доменов)

изделия. Кроме этого, магнитная предыстория зависит также от способа воздействия, которым она была наведена. Если было воздействие на деталь импульсным магнитным полем, то возникают в изделии вихревые токи, которые создают также магнитные поля, неравномерно распределенные из-за возникающего скин-эффекта. При намагничивании с применением соленоида в виде витков кабеля возникают размагничивающие поля, определяемые формой изделия и изменяющиеся по изделию от точки к точке. Следует отметить также влияние магнитной вязкости на распределение намагниченности в детали.

В результате действия этих факторов деталь намагничивается, создается магнитная предыстория магнитного состояния детали с неизвестным значением намагниченности. Поэтому последующее воздействие магнитным полем заданной напряженности не может привести к получению требуемой намагниченности детали, а, следовательно, высокой достоверности контроля.

Является актуальной задачей «Установление заданного импульсного тока без отрицательного действия неизвестного случайного параметра «магнитной предыстории». Эта задача решена в новом переносном магнитопорошковом дефектоскопе МДИ-ЭРАТ, в котором происходит установление заданного импульсного тока без отрицательного действия неизвестного случайного параметра «магнитной предыстории». В существующих, даже в новых переносных импульсных магнитопорошковых дефектоскопах в процессе определения заданной величины импульсного тока деталь многократно намагничивается, т.е. предварительно создается магнитная предыстория.

ЯВЛЕНИЕ ВРАЩЕНИЯ ЧАСТИЦ СУСПЕНЗИИ ПРИ МАГНИТОПороШКОВОМ КОНТРОЛЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТАМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Шелихов Г.С.

НИИИИ МНПО «Спектр»

Распределение магнитного поля вокруг детали оказывает существенное влияние на результаты магнитопорошкового контроля. Между полюсами П-образного полюсами электромагнита переменного тока магнитное поле является результатом суперпозиции магнитного поля электромагнита и размагничивающего поля, создаваемого материалом проверяемой детали.

С увеличением положительной полуволны тока в обмотках электромагнита происходит:

- увеличение напряженности H_z , создаваемого поля между полюсными наконечниками;
- увеличение поля рассеяния (размагничивающего поля) намагничиваемой детали и суперпозиция этих полей.

Результирующий вектор H_p из каждой точки на поверхности проверяемой детали (от полюсного наконечника до середины детали) увеличивается от нулевого значения и будет направлен под углом α к полюсному наконечнику N . Предположим, что при максимальном амплитудном значении положительной полуволны тока достигнута значительная намагниченность детали. В процессе уменьшения положительной полуволны от амплитудного значения до нуля и увеличении отрицательной полуволны тока происходит:

– при значении поля электромагнита H_z , равной коэрцитивной силе детали, тангенциальная составляющая напряженности поля H_r , будет близка к нулевому значению, а угол α будет близок к 90° ;

– при полностью размагниченном состоянии детали результирующий вектор поля будет равен нулю.

С увеличением отрицательной полуволны тока результирующий вектор будет направлен от каждой точки на детали к полюсному наконечнику N под углом α . Итак, за период изменения тока в обмотках электромагнита конец результирующего вектора опишет овал, близкий к окружности. Частицы магнитного порошка намагничиваются, становятся магнитными диполями, направленными по касательной к направлению магнитных силовых линий, т.е. по вектору H_p . Под действием магнитного момента они будут вращаться в соответствии с вращением вектора H_p и передвигаться к середине межполюсного расстояния, т.е. к области магнитной нейтрали, в которой нормальная составляющая H_n равна нулю. По мере приближения к этой области вращающий момент частиц уменьшается. В точке, в которой магнитный момент вращения становится меньше силы сопротивления, движение частиц прекращается. Интенсивность перемещения частиц суспензии или сухого порошка зависит от многих факторов: коэрцитивной силы материала проверяемой детали, вязкости дисперсионной среды, магнитных свойств материала частиц, от их дисперсности и других факторов. Это явление может наблюдаться при магнитопорошковом контроле с применением переносных электромагнитов переменного тока. При вращении частиц магнитной суспензии или сухого порошка выявляемость дефектов в зоне вращения снижается, происходит удаление порошка с дефектов, накопившегося в первый момент его нанесения на деталь. Поэтому при контроле деталей ответственного назначения переносными электромагнитами переменного тока следует учитывать это явление.

НОВЫЕ ПРИБОРЫ МАГНИТОПОРОШКОВОГО КОНТРОЛЯ ДЕТАЛЕЙ

Шелихов Г.С.¹, Путников Ю.Г.²

¹НИИИИИ МНПО «Спектр», ²ДНТЦ «Дефектоскопия»

Магнитопорошковому контролю подвергается большое количество деталей объектов авиационной, космической, железнодорожной и других видов техники

Качество и достоверность контроля зависят от многих факторов, в частности, от чувствительности магнитных суспензий, концентрации в них магнитного порошка, от технических характеристик применяемого дефектоскопа.

В процессе проведения магнитопорошкового контроля неизбежно действуют такие факторы как-то: постепенное загрязнение суспензии, на границе частица-жидкость идут окислительные процессы, поверхностно-активные вещества теряют свою эффективность, возникает автокоагуляция, магнитная коагуляция, снижается концентрация порошка из-за выноса частиц, которые оседают на проверенных деталях, а также из-за плохого размешивания суспензии. Все это приводит к снижению качества суспензии, к уменьшению ее чувствительности, что создает условия к пропуску дефектных деталей в эксплуатацию. Поэтому возникает необходимость проверки чувствительности суспензии и ее концентрации в процессе контроля. Для решения этой задачи разработаны: прибор ПКМС-2М для количественной оценки чувствительности суспензий и измеритель концентрации магнитного порошка в суспензии ИКС-1.

Прибор ПКМС-2М основан на выявлении исследуемой суспензией минимального поля рассеяния над дефектом на контрольном образце, входящем в комплект прибора. Это поле рассеяния можно изменять переключателем. Чем меньше напряженность поля над дефектом, которое выявляется суспензией, тем выше ее чувствительность. Прибором чувствительность суспензии измеряется в относительных единицах по шкале: 1,4; 1,3; 1,2; 1,1; 1,0; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1; 0,05; 0,01.

Прибор ПКМС-2М позволяет количественно оценивать соответствие суспензии техническим требованиям по выявляющим свойствам и принимать решение о замене суспензии по техническому состоянию, что позволит исключить случаи пропуска дефектов из-за использования некачественной суспензии.

Весьма полезным является прибор для измерения концентрации магнитного порошка в суспензии ИКС-1, который может применяться в условиях производства, ремонта и эксплуатации при магнитопорошковом контроле железнодорожной, автомобильной, судостроительной, авиационной, космической, и других видов техники. Технические характеристики прибора ИКС-1. Диапазон измерения концентрации порошка 1...50 г/л. Масса не более 500 г.

В условиях эксплуатации различных видов техники эффективно может быть использован новый переносный магнитопорошковый дефектоскоп МДИ-ЭРАТ. Питание дефектоскопа МДИ-ЭРАТ осуществляется от сети постоянного тока напряжением 24...27 В или от сети переменного тока напряжением 220 В, 50 Гц с использованием малогабаритного блока питания, входящего в комплект дефектоскопа. Максимальная потребляемая мощность не более 120 Вт. Максимальный намагничивающий ток с применением кабеля сечением 10 мм², длиной 400 см – не менее 4000 А.

Режимы работы: остаточной намагниченности (одиночные импульсы тока), способ приложенного поля (непрерывно следующие импульсы тока), размагничивание (импульсы тока, убывающие по амплитуде до 0).

В дефектоскопе исключено отрицательное влияние магнитной предыстории на качество магнитопорошкового контроля проверяемой детали. В существующих импульсных магнитопорошковых дефектоскопах в процессе определения заданной величины импульсного тока деталь многократно перемагничивается, создается «магнитная предыстория» детали, что снижает качество контроля.

Приборы ПКМС-2М, ИКС-1 и магнитопорошковый дефектоскоп МДИ-ЭРАТ являются современными приборами, применение которых внесет существенный вклад в обеспечение безаварийной работы авиационной космической и других видов техники.

СЕКЦИЯ 2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ НК И ТД

Руководители секции: Ефимов А.Г., Шкатов П.Н.

ПРИМЕНЕНИЕ МАТРИЧНЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ КОМПАНИИ EDDYFI (КАНАДА) ДЛЯ КОНТРОЛЯ УЗЛОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

Борисков Ю.

ОАО «ПЕРГАМ-ИНЖИНИРИНГ», Москва, Россия

Повышение уровня авиационной безопасности, а также высокие динамические нагрузки на все компоненты планера летательных аппаратов, требуют применения самых современных методов НК для предупреждения и выявления дефектов в конструкциях планера при производстве и эксплуатации воздушных судов гражданского и боевого назначения.

Вихретоковый контроль (ВК) за многие годы зарекомендовал себя, как надежный метод выявления непроваров, раковин, усталостных микротрещин и других дефектов несплошности при производстве и эксплуатации деталей и узлов авиационной техники.

С появлением матричных вихретоковых преобразователей производства компании EDDYFI (Канада), объединяющих несколько магнитных катушек в одном корпусе, область применения и производительность ВК значительно расширились.

В докладе рассмотрен опыт применения и перспективы данной технологии для контроля компонентов летательных аппаратов за рубежом и в России.

СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОТОЧНОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛОПРОКАТА

Ефимов А.Г., Бакунов А.С., Шубочкин А.Е.

ЗАО «НИИИИИ МНПО «Спектр»

Эксплуатирующиеся на многих промышленных предприятиях средства неразрушающего контроля давно выработали свой ресурс и не соответствуют современным требованиям, как в области обязательного документирования результатов контроля, так и по снижению влияния человеческого фактора на его достоверность. За годы, прошедшие с развала существо-

вавшей в СССР системы неразрушающего значительно снизился уровень профессионализма персонала, работающего в системе НК. В связи с этим особенно остро стоит задача разработки средств автоматизированных средств НК, а также средств НК, контролирующих правильность проведения контроля и автоматически документирующих его результаты.

Современные подходы к организации производства требуют интеграции системы неразрушающего контроля в информационную сеть предприятия. Актуальными становятся вопросы не только используемых в приборах интерфейсов обмена данными, так называемого «железа», но и протоколов обмена, формата хранения результатов контроля и т.п. Повышение сложности используемых программно-аппаратных средств приводит к ужесточению требований к обслуживающему персоналу, что в свою очередь вызывает необходимость разделения уровней доступа к настройкам средств НК. Возникает так называемый «инженерный» уровень доступа, при котором производится разработка методики контроля и настройка его основных параметров и «рабочий» уровень, включающий в себя доступ к функционалу, применяемому непосредственно при проведении неразрушающего контроля.

Разработанный ЗАО «НИИИИИ МНПО «Спектр» вихретоковый дефектоскоп ВД-41П+ в полной мере отвечает указанным требованиям и обеспечивает легкую интеграцию в производственный процесс современного промышленного предприятия.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ВИХРЕТОКОВЫЙ СКАНЕР-ДЕФЕКТОСКОП АСД «ВИХРЬ-1»

Коннов А.В., Кузнецов А.М., Новиков В.А., Загидулин Т.Р.
ЗАО НПП «Молния», Москва, Россия

В докладе рассматриваются результаты исследований вихретокового метода и создания автоматизированного сканера-дефектоскопа для контроля стальных трубопроводов в процессе ремонта и переизоляции.

Разработана методика предварительной обработки, анализа и интерпретации измеренного сигнала накладного дифференциального вихретокового преобразователя (ВТП) при контроле стального газопровода. Для удаления случайных помех и нелинейного тренда из сигнала ВТП предложен математический метод, основанный на вейвлетном преобразовании сигнала на основе вейвлетных функций алгебраического типа. Показано, что при вейвлетном преобразовании сигнала ВТП с оптимальными параметрами, величина соотношения сигнал/шум возрастает в несколько раз, что приводит к повышению надежности выявления дефектов сплошности в стальной трубе и точности определения их геометрических параметров.



a)



б)

Рис. 1. Вихревой контроль с применением сканера-дефектоскопа АСД «Вихрь-1» в летних (а) и в зимних (б) условиях

Приводится описание созданного на базе исследований 32-канального автоматизированного сканера-дефектоскопа для вихретокового контроля стального трубопровода диаметром от 720 до 1420 мм, толщиной стенки до 26 мм «Вихрь-1» (патент РФ № 2455625), обеспечивающего сплошной контроль трубы по винтовой траектории. Сканер-дефектоскоп снабжен специальной механической системой сканирования, бортовым компьютером с программным обеспечением для анализа и интерпретации измеренных сигналов, а также современными средствами телекоммуникации для организации беспроводного канала связи с удаленным персональным компьютером оператора. Разработаны алгоритмы определения геометрических параметров дефектов типа трещины и коррозии. Установлена возможность классификации дефектов сплошности в стальной трубе по величине фазы и полярности сигнала дифференциального ВТП на две группы: «Трещина» и «Коррозия металла». Программное обеспечение сканера-дефектоскопа позволяет осуществлять обработку информации и выдачу данных о состоянии каждой трубы в автоматическом режиме в течение пяти минут после окончания процесса контроля. Сканер-дефектоскоп прошел успешные стендовые испытания в ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в летний период (рис. 1, *а*).

Проведены испытания сканера-дефектоскопа в зимних условиях при температуре $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ на стенде Комсомольского ЛПУМГ ООО «Газпром трансгаз Югорск» (рис. 1, *б*), в процессе которых были выявлены эксплуатационные дефекты типа трещин, коррозии, вмятин.

Пример дефектов типа стресс-коррозионных трещин и соответствующей им сканограммы представлен на рис. 2.

Результаты проведенных стендовых испытаний сканера-дефектоскопа АСД «Вихрь» показали его работоспособность и высокую достоверность контроля, надежную выявляемость и идентификацию имеющихся дефектов сплошности типа стресс-коррозионных трещин и точечной коррозии металла в теле стальной трубы, в сварных швах и околосшовной зоне трубы.

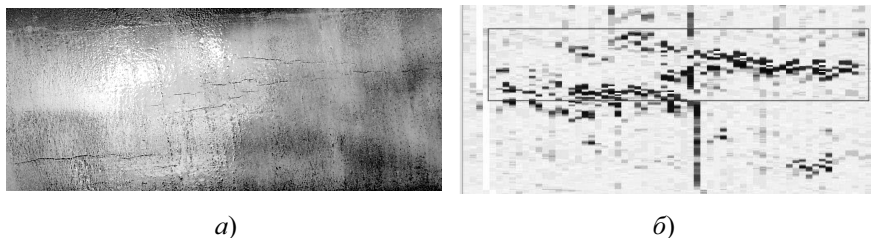


Рис. 2. Дефекты типа стресс-коррозионных трещин (*а*) и соответствующая им сканограмма (*б*)

Литература

1. **Загидулин Р.В., Коннов А.В.** Исследование информативности сигнала накладного вихретокового преобразователя над дефектами сплошности металла при электромагнитном контроле стальных изделий // Контроль. Диагностика. 2013. № 7(181). С. 19 – 27.
2. **Коннов А.В.** Автоматизированный электромагнитный (вихретоковый) сканер-дефектоскоп АСД «Вихрь» // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2013.
3. **Бадамшин Р.А., Загидулин Т.Р., Коннов А.В.** Исследование выявляемости трещины в сварном шве на основе вейвлетного преобразования сигнала дифференциального вихретокового преобразователя // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 4 (57). С. 168 – 174.

АМПЛИТУДНЫЙ КРИТЕРИЙ ГЛУШЕНИЯ ПАРОГЕНЕРАТОРНЫХ ТРУБ АЭС С ВВЭР

Лунин В.П.¹, Жданов А.Г.¹, Чегодаев В.В.¹, Лаврентьев А.А.¹,
Ловчев В.Н.², Гуцев Д.Ф.², Жуков Р.Ю.³

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва,

²ОАО «Концерн Росэнергоатом»,

³ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»

Работа была предпринята по договору с ОАО «Концерн Росэнергоатом» с целью принятия мер, направленных на снижение количества глушений теплообменных труб (ТОТ), что способствует сохранению теплообменной поверхности парогенераторов (ПГ) АЭС с реакторными установками ВВЭР. Одной из таких мер является переход от однопараметрического критерия глушения ТОТ по глубине дефекта (определяемой по фазе соответствующего вихретокового сигнала) на двухпараметрический критерий (по фазе и амплитуде сигнала). Это позволяет сохранять часть ТОТ, которые должны идти под глушение в периоды планово-предупредительного ремонта (ППР) на АЭС.

На первых этапах выполнения работы был проведен анализ возможности применения амплитудного критерия при глушении ТОТ ПГ АЭС, для чего были исследованы сигналы эксплуатационного вихретокового контроля этих труб по результатам ППР в 2011 г. на парогенераторах Кольской (ВВЭР-440) и Балаковской АЭС (ВВЭР-1000). Съём сигналов производился с использованием аттестованных установок контроля в составе манипулятора, а также прибора Harmonic 210 и программы сбора данных Aida 6.7 (на Кольской АЭС) и установки фирмы ZETEC MIZ-70 (на Балаковской АЭС). Исследования проводились с помощью разработанного в рамках выполнения договоров между ОАО «Концерн Росэнергоатом» и НИУ «МЭИ» программно-методического комплекса PIRATE [1], позволяющего

Таблица

Длина, мм	Глубина, %		
	70	80	90
20	3,58 В	4,39 В	6,96 В
10	3,50 В	4,31 В	6,76 В
5	3,01 В	3,33 В	5,00 В

оценивать основные геометрические параметры дефекта – его глубину и осевую протяженность.

Далее, в соответствии с «Нормами дефектов (критериями глушения) теплообменных труб парогенераторов реакторных установок АЭС с ВВЭР» [2] с помощью трехмерного конечно-элементного моделирования (программный комплекс MagNum3D [3]) были рассчитаны сигналы проходных преобразователей от дефектов типа продольной трещины допускаемой глубины и разных диапазонов длины. Геометрические параметры предельно допустимых дефектов были определены по данным, полученным ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» (кривые допустимых дефектов при гидроиспытаниях [4]). И наконец, были проведены тестовые испытания алгоритма выявления индикаций сигнала, соответствующих предлагаемому амплитудному критерию, на реальных сигналах эксплуатационного вихретокового контроля теплообменных труб парогенераторов по результатам ППР Кольской и Балаковской АЭС.

Указанным в [2] допустимым параметрам дефектов с помощью математического моделирования методом конечных элементов были спрогнозированы вихретоковые сигналы проходного дифференциального преобразователя на соответствующих рабочих частотах для каждой из штатных вихретоковых установок. Все смоделированные дефекты были расположены на внешней поверхности теплообменной трубки и имели раскрытие 0,1 мм. Для всех возможных сочетаний параметров геометрии дефектов (глубина – 70 %, 80 %, 90 %, осевая протяженность – 5 мм, 10 мм, 20 мм) были рассчитаны дифференциальные сигналы преобразователя для разных систем контроля. Например, в таблице приведены значения рассчитанных амплитуд сигналов для «ключевых» соотношений размеров дефектов при условии, что в качестве источника сигналов выступает штатная система контроля ZETEC (основная рабочая частота 100 кГц, нормировка 10 В).

При выборе критериальных значений амплитуды использованы кривые допустимых дефектов ТОТ при гидроиспытаниях, полученных в ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» [4] (рис. 1).

Если на «поле амплитуд» наложить кривую допустимых дефектов (рис. 1), то соответствующие точки пересечения этой кривой с координатными линиями фиксированной глубины (70, 80, 90 %) определяют требуемые значения амплитуды. В случае контроля системой MIZ-70 значения будут 3,63 В (для глубины 70 %), 3,33 В (80 %) и 2,21 В (90 %) – рис. 2.

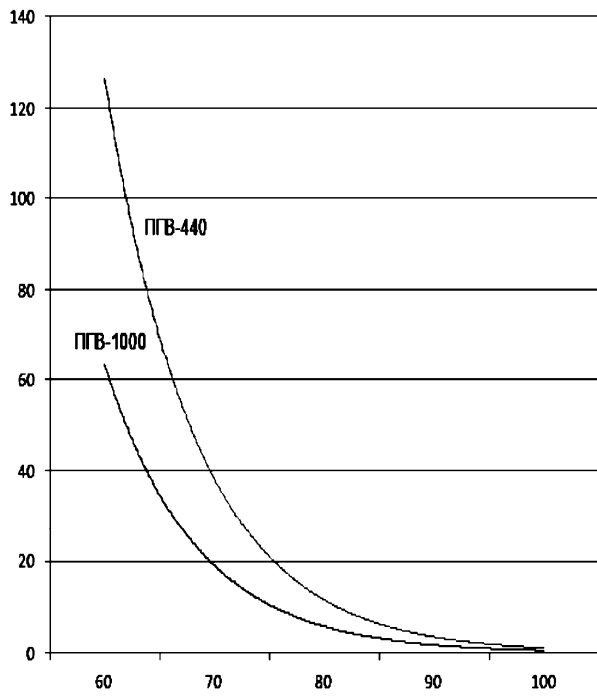


Рис. 1. Допустимые дефекты при гидроиспытаниях [4]

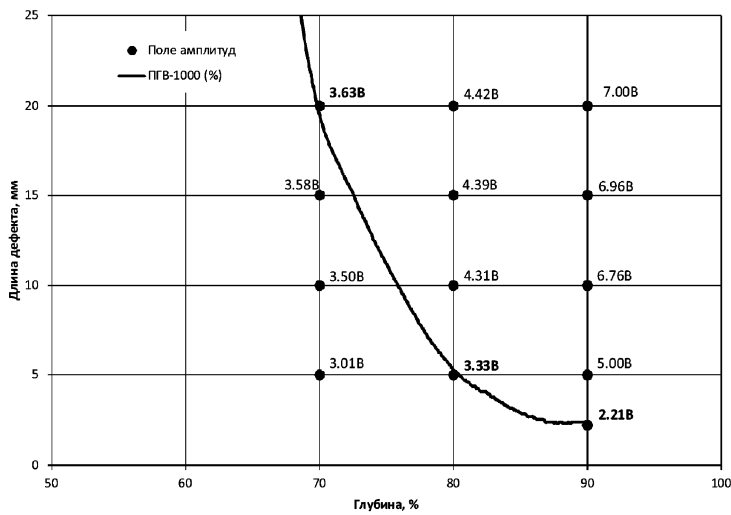


Рис. 2. Определение критериальных значений амплитуд сигнала для MIZ-70

Таблица

Допустимая глубина, % от толщины стенки	Допустимая амплитуда сигнала на открытом участке, В	Допустимая амплитуда сигнала от дефекта под решеткой, В
<59 %	Трубка не подлежит глушению	
60...68 %	<3,63	<3,16
69...77 %	<3,33	<2,90
78...87 %	<2,21	<1,92
88...100 %	Трубка подлежит глушению независимо от амплитуды	

В результате амплитудные критерии допустимости дефектов ТОТ ПГ при получении и обработке данных эксплуатационного контроля установкой ZETEC MIZ-70 (основная рабочая частота 100 кГц, нормировка 10 В) сведены в таблицу.

Тестовые испытания алгоритма выявления индикаций сигнала, удовлетворяющих амплитудному критерию, были проведены на сигналах эксплуатационного контроля ТОТ ПГ по результатам ППР Кольской и Калининской АЭС. Общее количество трубок 6040 (из них 1397 трубок ВВЭР-440 и 4643 – ВВЭР-1000), выявлено 967 индикаций (600 и 367 соответственно). Дефектов, трубки с которыми должны быть заглушены по критерию глубины, 260 штук, а дефектов, которые могут быть «сохранены» по амплитудному критерию – 89, т.е. 34 % трубок можно не глушить.

Литература

1. Свид. № 2007611344. Об официальной регистрации программы для ЭВМ «Программа анализа данных вихретокового контроля PIRATE» / Лунин В.П., Жданов А.Г., Щукис Е.Г., Лазуткин Д.Ю. от 28.03.07.
2. РД ЭО 1.1.2.16.0157–2009. Нормы дефектов (критерии глушения) теплообменных труб парогенераторов реакторных установок с ВВЭР. 2009.
3. Свид. № 2007611345. Об официальной регистрации программы для ЭВМ «Программа конечно-элементного моделирования MagNum3D» / Лунин В.П., Жданов А.Г. от 28.03.07.
4. **Обоснование** требований к вихретоковому контролю теплообменных труб горизонтальных парогенераторов / В.А. Григорьев, В.В. Уланов, А.А. Шубин, Н.Б. Трунов, С.Е. Давиденко, В.В. Денисов // Материалы 7-го международного семинара по горизонтальным парогенераторам. Россия, Подольск. 2006.

КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБАХ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ АЭС

Лунин В.П.¹, Чегодаев В.В.¹, Жданов А.Г.¹, Столяров А.А.¹,
Ловчев В.Н.², Гуцев Д.Ф.², Жуков Р.Ю.³

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва,
²ОАО «Концерн Росэнергоатом»,
³ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»

Исследования проведены в НИУ МЭИ по договору с ОАО «Концерн Росэнергоатом» в рамках стратегической задачи принятия мер, направленных на недопущение значительного утонения стенок теплообменных труб (ТОТ) парогенераторов (ПГ) АЭС, что способствует снижению количества внеплановых остановов реакторных установок из-за межконтурных течей. Одной из таких мер является проведение контроля объема электропроводящих отложений.

Теплообменная поверхность ПГ покрыта отложениями из окислов железа (магнетита) с различной долей других окислов (меди, никеля и др.). На участках трубного пучка, где сформировались и удерживаются условия для протекания «подшламовой» коррозии, со временем происходит образование электропроводящих продуктов в отложениях.

По величине азимутальной (по окружности) и осевой протяженности электропроводящего слоя в отложениях, а также его толщины, можно судить об интенсивности протекания коррозии (с восстановлением оксидов до металлической меди) и, как следствие, растворении определенного количества (объема) стали ТОТ.

Контроль электропроводящих отложений основан на существовании количественной связи между энергетическими параметрами низкочастотного сигнала проходного вихретокового (ВТ) преобразователя на абсолютном канале и объемом электропроводящего слоя в отложениях. Оценка проводится одновременно с проведением штатного автоматизированного вихретокового контроля (ВТК), использующего многочастотный метод [1]. Получаемый сигнал содержит информацию как о дефектах металла, так и об электропроводящих отложениях на ТОТ ПГ с одновременной фиксацией координат местоположения и протяженности вдоль оси.

Принцип выявления электропроводящих отложений с помощью внутритрубного проходного ВТ преобразователя заключается в том, что они по своему влиянию на ВТ сигнал физически эквивалентны влиянию дистанционирующей решетки (ДР) или некоторому утолщению стенки ТОТ. Характер изменения низкочастотного сигнала преобразователя (на абсолютном канале) существенно изменяется, когда преобразователь перемещается в зоне электропроводящих отложений. Угол наклона годографа ВТ сигнала в зоне электропроводящих отложений после его эталонирования и калибровки имеет приблизительно такое же значение, что и угол наклона сигнала ДР с отклонением $\pm 25^\circ$.

После завершения процедуры ВТ контроля с целью оценки геометрических параметров электропроводящих отложений проводится анализ данных программой PIRATE [2], в которой имеется возможность как автоматического считывания и обработки файлов данных контроля различных штатных ВТ установок, так и ручного (экспертного) анализа сигналов. Для этого в программу PIRATE встроены специальный программный модуль, позволяющий проводить оценку параметров отложений на стенках ТОТ ПГ со стороны второго контура.

Для определения геометрических параметров электропроводящего отложения сначала аналитик выполняет стандартную предобработку и эталонирование полученного сигнала по сигналу от калибровочной трубки с искусственными дефектами.

Программа PIRATE в автоматическом режиме по определенным критериям (признакам) находит координаты местонахождения электропроводящих отложений.

Аналитик, при необходимости, может выполнить ручное (экспертное) выделение на ВТ сигнале индикаций от электропроводящих отложений [3]. Просматривая файлы эталонированных данных, аналитик находит индикации с электропроводящими отложениями по следующим характерным признакам:

- на мнимой компоненте абсолютного канала индикации отложения выглядят как всплески большой амплитуды в положительную область сигнала, аналогичные индикациям от ДР;
- угол наклона годографа сигнала от проводящих отложений должен быть близок углу наклона годографа сигнала от ДР;
- характерная (типичная) форма сигналов представлена на рис. 1.

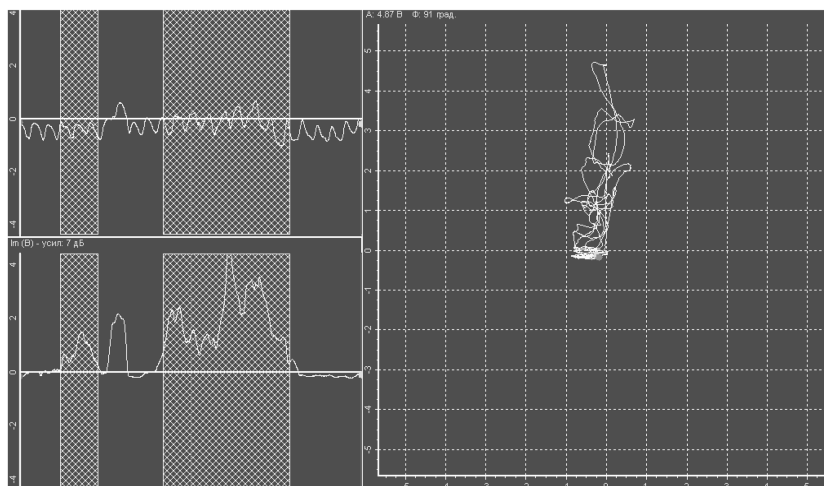


Рис. 1. Характерная форма сигнала от отложений на абсолютном канале ВТ преобразователя (в программе PIRATE)

На границах найденных участков аналитик устанавливает рамки начала и конца участка.

Программа автоматически определяет осевую (вдоль оси ТОТ) протяженность (L , мм) этого участка через шаг сканирования и количество отсчетов, приходящихся на индикацию.

Величина действующего значения низкочастотного сигнала преобразователя (энергетического параметра) на абсолютном канале на выделенном участке рассчитывается как среднее геометрическое (корень из суммы квадратов действительных и мнимых значений отсчетов сигнала, находящихся между установленными рамками, отнесенное к количеству отсчетов).

По измеренному действующему значению сигнала (энергетическому параметру P , В) определяется (поперечная) площадь электропроводящего слоя в отложениях (F , мм²) и объем электропроводящего слоя в отложениях (V , мм³) на выделенном участке по градуировочной зависимости, аппроксимированной прямой линией:

$$F = 0,22P; \quad V = LF.$$

Оценка средней толщины электропроводящих отложений на выделенном участке (T , мм) выполняется по формуле: $T = 0,04F$.

Разработанные методические указания [4] рекомендованы к применению при обработке данных эксплуатационного ВТК до и после проведения химической и гидродинамической очистки для оценки ее эффективности.

Литература

1. РД ЭО 0664–2009. Общие технические требования к проведению контроля теплообменных труб парогенераторов ПГВ-440 и ПГВ-1000 (М) методом вихревых токов.
2. Свидетельство № 2007611344. Об официальной регистрации программы для ЭВМ «Программа анализа данных вихретокового контроля PIRATE» / Лунин В.П., Жданов А.Г., Щукис Е.Г., Лазуткин Д.Ю. от 28.03.07.
3. Руководство по эксплуатации программы анализа данных для систем вихретокового контроля PIRATE. 2013.
4. МУ 1.3.3.99.0169–2013. Оценка объема электропроводящих отложений на теплообменных трубах парогенераторов атомных электрических станций с ВВЭР: методические указания. 2013.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ВИХРЕТОКОВОГО МЕТОДА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОМ КОНТРОЛЕ УЗЛОВ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ЗАРУБЕЖНОГО И ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Опанасенко А.В.

Опыт применения современного вихретокового оборудования при решении задач контроля узлов самолетов, например:

- обнаружение поверхностных трещин в лопаточных пазах двигателей;
- обнаружение усталостных трещин на боковой поверхности заклепочных и болтовых отверстий;
- обнаружение подповерхностных скрытых усталостных трещин в многослойных заклепанных авиационных узлах;
- обнаружение поверхностных трещин в авиационных колесах и др.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НАКЛАДНЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Петренко Е.О., Арбузов Е.В.
МГТУ им. Баумана, Москва, Россия

В докладе показана возможность использования математического аппарата описания полей постоянного тока для моделирования картины распределения вектора напряженности электромагнитного поля в расчете квазистатических полей вихретоковых преобразователей (ВТП). Доказана идентичность картины поля и показано практическое отсутствие влияния частоты переменного тока, питающего вихретоковый преобразователь, на картину распределения вектора напряженности электромагнитного поля для накладных параметрических преобразователей произвольной формы в свободном пространстве. Дано теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение для разных частот.

Вихретоковый метод контроля основан на взаимодействии переменного электромагнитного поля преобразователя с проводящим объектом контроля. Теоретический расчет при взаимодействии с объектом контроля в виде бесконечного проводящего полупространства хорошо разработан основоположниками вихретокового метода контроля.

При создании различных измерительных приборов, оснащенных накладными параметрическими вихретоковыми преобразователями, достаточно часто возникает необходимость проектирования первичного преобразователя, что называется «под объект контроля». Для уменьшения объема физического моделирования предлагается метод компьютерной визуализации полей вихретокового преобразователя произвольной формы. Компьютерная визуализация картины магнитного поля позволяет оценить особенности распределения вектора напряженности в пространстве при различных конфигурациях обмоток преобразователей, подобрать наиболее подходящие конструкции, оценить краевые эффекты и, в итоге, быстрее, легче и дешевле найти желаемое решение.

При расчете электромагнитного поля тока замкнутого контура используют уравнения Максвелла для квазистационарных полей в линейной среде. Для линейной среды справедлив принцип суперпозиции. Решение уравнений Максвелла аналитически вызывает большие сложности. С развитием вычислительной техники стало возможным решать задачи электродинамики численными методами, которые дают возможность смоделировать распределение электромагнитного поля. Из дискретизационных методов чаще всего используют метод конечных элементов. Уравнения Максвелла это дифференциальные уравнения в частных производных. Для их решения необходимо задать начальные и граничные условия и получить решение с помощью какого-либо программного пакета, реализующего метод конечных элементов. Но можно пойти иным путем, используя закон Био-Савара в современной формулировке для стационарного поля.

Для решения задачи приняты следующие допущения: размеры сечения проводника с током пренебрежимо малы по сравнению с другими линейными размерами контура с током; контур с током находится вне поля действия других контуров и проводящих поверхностей, т.е. находится в свободном пространстве; контур с током неподвижен и не меняет ориентации в пространстве. Из первого допущения вытекает то, что плотность зарядов нужно указывать не на единицу объема, а на единицу длины проводника. Используя данный метод, можно вычислить параметры электромагнитного поля произвольного контура с током в произвольной точке пространства.

Для расчета топологии электромагнитного поля была создана программа моделирования Magnetic Field 1.0. Программа представляет собой приложение для работы с полями ВТП. Программа имеет оконный интерфейс, с помощью которого задаются различные свойства объекта исследования и строятся датчики различной конфигурации в 3D. Пользователь может просматривать сцену с разных точек зрения. При этом картинка на экране остается плоской, но перемещая точку обзора, пользователь может наблюдать вид трехмерного объекта с разных сторон.

Модель может конструироваться из дуг и прямых в пространстве. Когда замкнут контур преобразователя, можно построить картину его поля. Данная программа позволяет построить 3D-поле и, делая сечения его в разных плоскостях, получить графики распределения компонентов вектора электромагнитной индукции по плоскостям. Можно также получить количественные значения составляющих вектора в виде файла в программе Excel.

При компьютерном моделировании распределения вектора напряженности электромагнитного поля использовался расчет поля витка, запитанного постоянным током. В докладе показана правомерность использования закона Био-Савара, который справедлив для магнитных полей постоянного тока, при моделировании компонентов вектора напряженности переменного магнитного поля витка, находящегося в свободном пространстве.

Для подтверждения теоретических выводов были проведены физический и компьютерный эксперименты. При моделировании выбран наклад-

ной вихретоковый преобразователь квадратной формы восьмеркообразной катушки. Измерения напряженности магнитного поля проводились измерительным зондом, в качестве которого использована катушка индуктивности бескаркасной катушки. В ходе эксперимента измерялась ЭДС, наведенная переменным магнитным полем вихретокового преобразователя в измерительном зонде, при перемещении зонда вдоль и поперек катушки по сетке с шагом 5 мм. Вихретоковый преобразователь запитывался от генератора переменным напряжением с амплитудой 13 В и частотами 500 кГц, 1 МГц и 2 МГц. Данные измерений сведены в таблицу, созданную в среде MS Excel. По результатам измерений наведенной ЭДС рассчитан модуль вектора напряженности магнитного поля и построены 3D графики.

Затем по этим же геометрическим параметрам, в программной среде MagneticField 0.1, смоделирован виток ВТП и проведено компьютерное построение картины поля витка.

На рис. 1 показаны для сравнения сечения картины поля, параллельные оси X и проходящие через ось симметрии преобразователя.

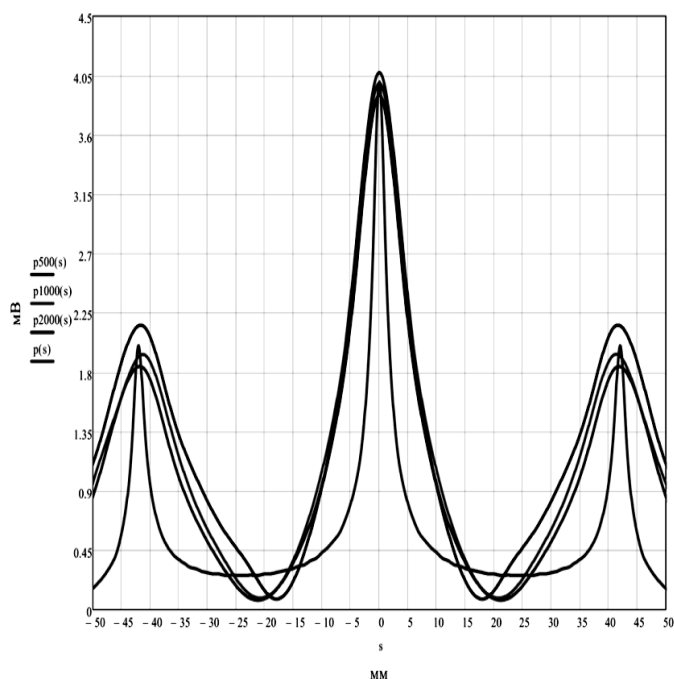


Рис. 1. Серединные сечения всех графиков и теоретическая кривая:

- $p500(s)$ – частота эксперимента 500 кГц;
- $p1000(s)$ – частота эксперимента 1000 кГц;
- $p2000(s)$ – частота эксперимента 2000 кГц;
- $p(s)$ – результаты компьютерного моделирования

На графике разными цветами дано распределение модуля вектора напряженности магнитного поля для физического эксперимента на разных частотах и для компьютерного моделирования. При анализе результатов получено практически полное совпадение графиков – расхождение по пиковым значениям менее 3 %.

Таким образом, в результате теоретических и экспериментальных исследований показано отсутствие влияния частоты переменного магнитного поля ВТП на величину модуля вектора напряженности магнитного поля в пределах рабочих частот вихретоковых преобразователей и подтверждена правомерность использования закона Био-Савара при компьютерном моделировании картины распределения модуля вектора напряженности магнитного поля накладного ВТП произвольной формы в свободном пространстве. Все это дает возможность исследовать картину распределения вектора напряженности электромагнитного поля вихретоковых преобразователей любой геометрии.

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ЛИНЕЙНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ УГЛЕПЛАСТИКОВ

Потапов А.И., Сясько В.А., Чертов Д.Н.
ЗАО «Константа», Санкт-Петербург, Россия

Углепластики в настоящее время все активнее используются на многих авиакосмических и машиностроительных предприятиях в России и за рубежом при производстве изделий ответственного назначения, что повышает требования к их контролю. Многослойная структура с переменной по глубине и площади электропроводностью, которая может варьироваться в пределах до 15 %, высокая шероховатость поверхности, непостоянство толщины, отличные от металлов природа и характер дефектов – все эти мешающие параметры вносят дополнительные погрешности и, в ряде случаев, не позволяют выполнять их контроль вихретоковыми методами аналогично металлам.

Одними из наиболее опасных дефектов являются расслоения, возникающие при производстве и эксплуатации в условиях высоких знакопеременных нагрузок. Традиционные круговые первичные измерительные преобразователи, оси которых расположены нормально к объекту контроля, для выявления расслоений не применимы в связи с тем, что вихревые токи не изменяют свою картину в зоне дефектов. Для решения этой проблемы необходимо использовать иную конструкцию преобразователя, создающего в объекте контроля вихревые токи с вертикальной составляющей, в частности, при использовании первичных измерительных вихретоковых

преобразователей с линейными источниками токов, в объекте контроля появляются токи рассеяния, которые пересекают расслоение и изменяют вносимое напряжение преобразователя.

Сложность и оригинальность конструкции трансформаторного четырехобмоточного преобразователя с линейным участком не позволяют рассчитать его параметры по известным формулам, что потребовало нового подхода при моделировании численными методами.

Сформулированы основные принципы построения вихретоковых трансформаторных четырехобмоточных первичных измерительных преобразователей с линейными участками токов, использующих в качестве первичного информативного параметра изменение фазы сигнала измерительной обмотки, методики их оптимизации, а также конечно-элементные модели. Представлены картины вихревых токов при взаимодействии рассматриваемых преобразователей с объектом контроля, имеющим в структуре расслоение, рассчитаны и экспериментально подтверждены годографы относительного вносимого напряжения в зависимости от изменения контролируемого (площадь и глубина залегания) и мешающих параметров (геометрических и электрофизических) для нескольких вариантов исполнения.

Разработанные на основании исследований высокочастотные измерительные преобразователи со встроенной электроникой нашли применение на ряде предприятий, изготавливающих и эксплуатирующих крупногабаритные углепластиковые конструкции.

Приведены основные результаты экспериментальных исследований первичных измерительных преобразователей в лабораторных и производственных условиях на реальных изделиях.

ПОДАВЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕШАЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ВИХРЕТОКОВОЙ ТОЛЩИНОМЕТРИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Сясько В.А.

ЗАО «Константа», С.-Петербург, Россия

В настоящее время у большинства ведущих производителей появились толщиномеры металлических покрытий с заявляемым пределом допускаемой основной абсолютной погрешности измерения $\Delta h \leq \pm((0,005 \dots 0,01)h + 1)$ мкм в области малых толщин h . При этом подразумевается, что испытания приборов проводят в нормальных условиях на образцовых основаниях и рабочих эталонах (мерах толщины покрытий), идентичных тем, на которых определяли градуировочную характеристику. Однако, заявляемое значение Δh может вводить неподготовленных пользователей в заблуждение относительно достоверности результатов измерения в производственных условиях.

Метрологические характеристики толщиномеров определяются методом измерений, построением измерительных преобразователей, используемыми алгоритмами преобразования и вычисления h по градуировочной характеристике. Существенное влияние оказывают мешающие параметры, действующие на измерительные преобразователи в процессах градуировки, калибровки и измерений. К геометрическим мешающим параметрам относятся: толщина основания T , диаметр зоны измерения D , радиус кривизны r и шероховатость R_z поверхности. Физические мешающие параметры включают: удельные электропроводности σ_1, σ_2 и относительные магнитные проницаемости μ_1, μ_2 покрытия, основания и сердечников, температуру t , внешние электромагнитные поля и др. Также существенное влияние на достоверность результатов оказывает состояние чувствительного элемента (например, истирание в процессе эксплуатации контактной поверхности сердечника).

Были разработаны модели вихретоковых трансформаторных и параметрических измерительных преобразователей, использующих в качестве информативного параметра фазу, амплитуду и фазу, изменение частоты собственных колебаний, а также модель магнитоиндукционного трансформаторного измерительного преобразователя, для которых методом конечных элементов исследовано влияние информативных и мешающих параметров применительно к цеховым условиям эксплуатации современных отечественных машиностроительных производств и показано, что выпускаемые в настоящее время и используемые в промышленности толщиномеры покрытий не могут обеспечить заявленную в руководстве по эксплуатации погрешность измерения $\Delta h \leq \pm(0,01h + 1)$ мкм в условиях технологических разбросов физических и геометрических параметров изделий, а также вариации параметров внешней среды большинства машиностроительных производств.

Для подавления или уменьшения влияния рассматриваемых мешающих параметров были разработаны новые структуры малогабаритных первичных измерительных преобразователей и основные положения оптимизации их параметров, принципы формирования пробной энергии, балансировки и настройки, а также тестовой обработки измерительной информации. Также были разработаны технология изготовления и аттестации натурных ступенчатых мер толщины, методы градуировки, калибровки и измерений с их использованием.

Приведены основные результаты исследований и разработок, а также экспериментальных исследований измерительных преобразователей в лабораторных и цеховых условиях при измерении толщины электропроводящих ферро- и неферромагнитных покрытий на черных металлах, электропроводящих неферромагнитных покрытий на цветных металлах при различных сочетаниях электропроводностей и магнитных проницаемостей.

Разработанный и сертифицированный электромагнитный толщиномер «Константа К6 гальванический», комплект вихретоковых и магнитоиндукционных измерительных преобразователей и эталонных (рабочих) мер

толщины, а также методики его применения позволили обеспечить для большинства задач измерения металлических гарантированную погрешность на уровне $\Delta h \leq \pm(0,01h + 1)$ мкм для авиакосмических, судо- и машиностроительных заводов.

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ВИХРЕТОКОВОГО ДЕФЕКТΟΣКОПА

Хвостов А.А., Покровский А.Д.
ФГБОУ ВПО «НИУ» МЭИ», Москва, Россия

Метод отстройки от зазора вихретокового дефектоскопа, предложенный в [1], заключается в том, что вихретоковый преобразователь устанавливают на бездефектный участок поверхности изделия и переводят устройство в режим снятия годографа на бездефектном участке поверхности объекта. Поднимают ВПП на расстояние, на котором влиянием объекта контроля на сигнал ВТП можно пренебречь. В процессе увеличения зазора устройство производит последовательные измерения, которые фиксируются в его памяти. Затем повторяют этот процесс на участке объекта, содержащем калибровочный дефект. В результате получают две зависимости. В последствие, в процессе контроля сигнал, получаемый с ВТП в виде точки на комплексной плоскости, оказывается в пределах области между этими двумя зависимостями. По расстоянию от этой точки до обеих зависимостей можно вычислить относительный размер дефекта. Также предусмотрен способ перехода с одного образца на другой. Для этого на новом образце нужно переснять только годограф для бездефектной области, а затем программно повернуть комплексную плоскость так, чтобы этот годограф максимально совпал с предварительно снятым годографом.

Дополнительным преимуществом указанного способа является возможность оценки относительной величины обнаруженного дефекта независимо от величины рабочего зазора и привязка результатов контроля к эталонному дефекту. Все указанные величины могут вычисляться в контроллере устройства и выводиться на дисплей в цифровом и графическом изображении [1]. Для демонстрации эффективности разработанного метода отстройки от влияния зазора и адаптации к изменению свойств объекта контроля разработан прототип адаптивной системы вихретокового неразрушающего контроля.

Блок управления и индикации содержит микроконтроллер [2], устройство вывода информации – ЖКИ дисплей, устройство ввода информации – клавиатура, и схему контроля и обслуживания аккумулятора питания. Блок связан по двухпроводному интерфейсу с блоком вихретокового датчика, который, в свою очередь содержит измеритель импеданса, усилитель мощности, вихретоковый преобразователь, управляемый аттенюатор и ППЗУ.

Управление устройствами осуществляется по двухпроводному интерфейсу. Посредством него же в контроллер поступают результаты измерений из измерителя импеданса.

Основой устройства является микропроцессор фирмы Atmel – ATmega64-16AU [3]. Микроконтроллер оснащен блоками стандартных интерфейсов, из которых один – TWI, используется для связи с блоком датчика и выведен на разъем. Второй стандартный интерфейс – SPI, используется для управления графическим жидкокристаллическим дисплеем LPH7779 от Nokia, с встроенным контроллером PCD8544, имеющим разрешение 84×48 точек. Этот же интерфейс используется для программирования микроконтроллера. К устройству может быть подключено внешнее зарядное устройство. Подключение автоматически вызывает включение режима заряда аккумуляторной батареи по прерыванию и обеспечивает стандартную диаграмму заряда для литий-ионного аккумулятора.

Важнейший элемент схемы – измеритель импеданса AD5933 от Analog Device, на который подается тактовая частота от кварцевого генератора. Выходной сигнал синусоидальной формы с DDS синтезатора измерителя поступает через усилитель мощности на операционном усилителе и на обмотки возбуждения дифференциального вихретокового преобразователя. Блок датчика соединяется с блоком управления и индикации посредством разъема, по которому передается питание и сигналы TWI.

Программное обеспечение состоит из основной программы и трех библиотек подпрограмм: управления и измерения; управления устройствами и интерфейсом TWI; работой графического дисплея. Все программное обеспечение написано на языке СИ [4]. Некоторые подпрограммы имеют вставки на языке ассемблера, так как не все команды для ATmega64-16AU нашли отражение в версии СИ, ориентированной на контроллеры AVR. Общий объем в памяти программ микроконтроллера – примерно 40 кбайт.

Работа с прибором начинается с запуска тактового генератора, с чего и начинается выполнение программы. В первый момент происходит инициализация периферийных устройств микроконтроллера, а так же ППЗУ, измерителя в блоке преобразователя и графического дисплея. Выбрав режим настройки объекта контроля, оператор должен пройти пошаговую процедуру калибровки прибора. В процессе ее выполнения будет снят годограф влияния зазора на бездефектном участке настроечного образца и на участке, содержащем дефект, сигнал от которого принят за 100 %. После завершения процедуры прибор перейдет в режим контроля объекта.

Если в первом разделе меню оператор выберет режим адаптации к объекту контроля (что предполагает уже проведенные операции выбора режимов контроля и настройки на объект контроля), то он последовательно пройдет по этапам адаптации к объекту контроля. На первом этапе будет

измерено напряжение недокомпенсации ВТП в воздухе, а на втором – снят годограф влияния зазора над бездефектным участком объекта контроля. Следующий этап проходит автоматически, без участия оператора. На этом этапе сравнивается положение годографов влияния зазора на бездефектных участках настроечного образца и объекта контроля, определяется угол поворота комплексной плоскости вносимых сигналов для совмещения этих годографов. Далее прибор переходит в режим контроля объекта, используя для оценки величины дефекта годографы, снятые на настроечном образце, но с учетом поворота комплексной плоскости, определенном на этапе адаптации.

В режиме контроля на экране в графическом и цифровом режиме индицируются относительные значения зазора и дефекта. На экране, также присутствует графическое изображение порога срабатывания звуковой сигнализации, при этом порог может регулироваться в пределах от 4 до 120 % с шагом 4 %. Выход из режима контроля осуществляется нажатием кнопки «ввод» и переводит прибор в первый раздел меню.

Конструктивно преобразователь состоит из двух идентичных частей, каждая из которых содержит стержень из феррита НМ2000, диаметром 1,8 мм и длиной 8 мм. На каждый стержень намотаны две идентичные обмотки из провода ПЭВ-2 диаметром 0,06 мм. Каждая обмотка содержит 75 витков провода. Возбуждающие обмотки включены согласно, а измерительные встречно.

1. Результаты эксперимента показали эффективность предложенного способа отстройки от зазора на настроечном образце в пределах до трех диаметров преобразователя.

2. Дополнительная погрешность определения величины дефекта не превышает в большинстве случаев единиц процентов и только в некоторых случаях может достигать до 20 %.

Литература

1. **Пат. на изобретение RU 2487344 С2.** Способ контроля свойств объектов из электропроводящих материалов / Покровский А.Д., Хвостов А.А. Дата выдачи патента: 09.01.2014.

2. **Малинин А.В.** Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. 2006.

3. **Ioan Susnea, Marian Mitescu.** «Microcontrollers in Practice (Springer Series in Advanced Microelectronics)», 266 pages, Publisher: Springer; 2005 edition (August 22, 2005).

4. **Semiconductor Devices** «Semiconductor Devices», 240 pages. Publisher: IK International Publishing House (February 17, 2009).

ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ НЕМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

Шкатов П.Н., Мостяев И.В.
МГУПИ, Москва, Россия

Доклад посвящен повышению эффективности вихретокового контроля за счет применения магнитной жидкости. Показано, что такой способ контроля целесообразно использовать для выявления дефектов, расположенных с тыльной относительно сканируемой стороны в немагнитных электропроводящих объектах. Рассматриваемый способ особенно эффективен при дефектоскопии полых объектов со сложной формой поверхности со стороны внутренней полости, например, охлаждаемых лопаток газотурбинных двигателей.

Вихретоковый метод неразрушающего контроля широко используется для дефектоскопии электропроводящих объектов. Из-за скин-эффекта ВК используется преимущественно для обнаружения дефектов, выходящих на сканируемую поверхность. Для выявления дефектов, развивающихся с тыльной относительно сканируемой поверхности, ВК, как правило, не применяется из-за экранирующего слоя металла, закрывающего дефект.

Эффективность выявления вихретоковым методом дефектов, выходящих на тыльную поверхность немагнитных объектов, можно существенно увеличить за счет применения магнитной жидкости. Магнитные жидкости – представители класса коллоидных растворов. Они обладают свойствами обычных жидкостей, имеют относительную магнитную проницаемость $\mu = 5 \dots 7$ и способны под воздействием магнитных полей изменять свое положение в пространстве [1]. Магнитная жидкость может заполнять полость дефектов под действием капиллярных сил, усиливаемых, при необходимости, создаваемыми давлением жидкости и постоянным магнитным полем. После заполнения магнитной жидкостью полости дефектов, расположенных с тыльной стороны сканируемой поверхности, чувствительность к ним при соответствующем выборе частоты многократно возрастает. Магнитный и немагнитный объекты по-разному воздействуют на переменный магнитный поток, создаваемый вихретоковым преобразователем (ВТП). За счет магнитных свойств ферромагнетиков магнитный поток усиливается, а под действием вихревых токов в немагнитном металле – ослабляется. Выбирая достаточно низкую рабочую частоту, можно добиться слабого влияния немагнитного металла ($\mu = 1$) при сохранении влияния магнитной жидкости. Иначе говоря, экранирующие свойства слоя немагнитного металла, находящегося между дефектом с заполненным магнитной

жидкостью полостью и ВТП, проявляться практически не будут. Таким образом, будет считываться прямое воздействие магнитной жидкости, заполнившей полость дефекта. Оно будет определяться формой и объемом жидкости, расстоянием до ВТП и ее магнитной проницаемостью.

В докладе приводятся результаты расчетно-теоретических и экспериментальных исследований, отражающих соответствующие зависимости.

Литература

1. Диканский Ю.И., Закинян А.Р., Константинова Н.Ю. О магнитной проницаемости магнитодиэлектрической эмульсии // Журнал технической физики. 2008. Т. 78. Вып. 1. С. 21 – 26.

ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ ПРОВОЛОКИ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА

Шкатов П.Н.

МГУПИ, Москва, Россия

Доклад посвящен вихретоковому контролю качества сверхпроводящей проволоки путем измерением в ней отношения медь/не медь с одновременной дефектоскопией ее медной оболочки. Разработанная в НУЦ «КАСКАД» МГУПИ вихретоковая установка «БОЗОН» предназначена для контроля качества сверхпроводящей проволоки в процессе ее производства на предприятиях России, в соответствии с разработанными в центре Европейского совета ядерных исследований (Церн) требованиями плана обеспечения качества БАК (большого адронного коллайдера).

Согласно требованиям Европейского совета ядерных исследований предназначенная для изготовления обмоток электромагнитов БАК сверхпроводящая проволока должна контролироваться в процессе ее производства. Требуется 100 % вихретоковая дефектоскопия медной оболочки и точечные замеры отношения «медь/не медь».

Из-за особенностей технологии [1] внешний диаметр проводника остается неизменным и составляет, в зависимости от модификации, величину порядка 0,8...0,9 мм. В Повышение объемной доли стабилизирующей меди приводит к уменьшению размера сверхпроводящей сердцевины. С другой стороны, уменьшение доли стабилизирующей меди приводит к недопустимому перегреву при защитном выводе тока через медную оболочку. Следовательно, имеется оптимум отношения объемных долей медной и не медной составляющих сверхпроводящего провода, характеризуемого параметром k_m = «медь/не медь». По требованию разработчиков проекта он должен находиться в диапазоне $k_m = 1,0 \pm 0,1$. Для провода с внешним диаметром

$d = 0,82$ мм это соответствует номинальной толщине медной оболочки $t_n = 0,12$ мм при нижнем допустимом значении $t_{нд} = 0,1126$ мм и верхнем допустимом значении $t_{вд} = 0,127$ мм.

В работе [2] была показана принципиальная возможность решения обеих задач контроля вихретоковым методом. При этом в процессе производства будет непрерывно выполняться не только дефектоскопия, но и измерение отношения k_m . Возможность измерения отношения «медь/не медь» определяется тем, что при обычной температуре удельная электрическая проводимость медной оболочки составляет 58,8 МСм/м, а не медной части (бронзовая матрица с ниобиевыми волокнами + танталовые вставки + ниобиевый барьер) – 5,59 МСм/м.

Вместе с тем, для реализации измерения k_m применить известные средства вихретокового контроля не удастся. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что при оптимальной рабочей частоте $f = 30 \dots 60$ кГц необходимо регистрировать изменения выходного сигнала проходного ВТП на уровне 0,05 %.

Так как измеряемая величина весьма мала, необходима высокая долговременная стабильность параметров ВТП. Это связано еще и с тем, что контроль проволоки совмещается с процессом ее изготовления. При этом отсутствует возможность подстройки электронного блока устройства, так как для этого необходимо извлечь контролируемую проволоку из рабочей полости ВТП и ввести туда стандартные образцы. Это невозможно до полного изготовления бухты провода, имеющей длину до 20 км.

В настоящее время вихретоковых средств контроля с требуемыми техническими характеристиками не выпускается, что привело к необходимости настоящей разработки. Так как оптимальные рабочие частоты для дефектоскопии и измерения отношения k_m близки, целесообразно их одновременное решение с помощью общего ВТП и электронного блока.

В результате макетирования и длительных испытаний различных вариантов была выбрана конструкция проходного ВТП, состоящего из возбуждающей обмотки, измерительной обмотки абсолютного канала (для измерения отношения «медь/не медь») и двух идентичных дифференциально включенных измерительных обмоток дефектоскопического канала. В качестве механической основы ВТП используется стальная трубка из немагнитной нержавеющей стали с внутренним диаметром 1,6 мм и внешним – 2,0 мм. На внешнюю поверхность стальной трубки виток к витку намотаны две обмотки – возбуждающая обмотка и измерительная обмотка абсолютного канала. Измерительные обмотки дефектоскопического канала размещены на диэлектрическом каркасе, установленном симметрично относительно возбуждающей обмотки. Установка имеет два идентичных по структуре измерительных канала: дифференциальный – для дефектоскопии и абсолютный – для измерения отношения «медь/не медь».

Градуировка абсолютного канала устройства проводится с помощью стандартных образцов в виде проволок с внешним диаметром 0,82 мм и с различным отношением «медь/не медь». Работоспособность дефектоскопического канала проверяется с помощью образцов с искусственными дефектами в виде сверлений диаметром 0,3 мм.

При проведении контроля сверхпроводящая проволока перемещается через полость ВТП. При этом через АЦП на вход компьютера поступает информация от обоих каналов установки, а также от датчика перемещения проволоки.

Проведенные испытания показали соответствие разработанного устройства предъявляемым требованиям.

Литература

1. **Development** of the Nb₃Sn Bronze Strand of TF Conductor Sample for Testing in SULTAN Facility / A. Shikov, V. Pantsyrny, A. Vorobieva, E. Dergunova, L. Vogdaev, N. Kozlenkova, K. Mareev, V. Tronza, V. Sytnikov, A. Taran, A. Rychagov // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2009. Vol 19. № 3.

2. **Применение** вихревых токов для контроля сверхпроводников на основе соединения Nb₃Sn для ИТЭР при их производстве / П.Н. Шкатов, В.И. Тронза, Д.К. Фигуровский, Е.А. Дергунова, С.М. Балаев, А.Е. Воробьева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел. 2010. № 4(282). С. 120 – 127.

ИЗМЕРЕНИЕ ГЛУБИНЫ НАКЛОННЫХ ТРЕЩИН И ТРЕЩИН НА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ЭЛЕКТРОПОТЕНЦИАЛЬНЫМ МЕТОДОМ

Шкатов П.Н.
МГУПИ, Москва, Россия

В докладе рассматривается задача оценки параметров поверхностных трещин в металлических объектах электропотенциальным методом. Приведены результаты исследования влияния кривизны поверхности контролируемого объекта, а также угла наклона плоскости трещины, предложены способы измерения и алгоритмы интерпретации регистрируемых сигналов с учетом влияния кривизны поверхности и угла наклона трещин.

Измерение глубины трещин электропотенциальным методом основано на наличии взаимосвязи между параметрами трещины и величиной регистрируемого напряжения U_r на поверхности дефектного участка. Сложность оценки глубины h трещины электропотенциальным методом состоит в большом числе факторов, влияющих на регистрируемое напряжение. К этим факторам относятся: электромагнитные свойства металла и кривизна поверхности металлического объекта, его толщина на контролируемом участке, длина l трещины, толщина T контролируемого участка.

Отстроиться от влияния вариации удельной электрической проводимости удастся, измеряя отношение напряжений U_r и U_0 на дефектном и прилегающем бездефектном участках, соответственно.

Влияние толщины контролируемого участка и длины трещины удастся существенно ослабить, за счет скин-эффекта при использовании переменного тока [2 – 11]. Однако в этом случае необходимо иметь контрольные образцы с искусственными дефектами, изготовленными из одинаковой с контролируемым объектом марки стали, так как на регистрируемые сигналы существенное влияние оказывает вариация магнитной проницаемости металла. Влияние магнитной проницаемости металла полностью устраняется при использовании постоянного тока, но это приводит к существенному влиянию толщины T и длины трещины l .

Для интерпретации результатов измерения, как на постоянном, так и на переменном токе, обычно, строят градуировочную характеристику для каждого электропотенциального преобразователя (ЭПП) с помощью плоских образцов с длинными щелями различной глубины, ортогональными к поверхности, как описано, например, в работе [12].

В работе [13] на основе комбинации метода конформных изображений и интегральных уравнений аналитически решена задача интерпретации сигналов полученных при пропускании постоянного тока для трещины конечной длины l прямоугольной формы на участке с произвольной толщиной T . Проведенный с помощью полученного решения анализ показал, что влияние вариации T и l при измерениях на постоянном токе может приводить к погрешности до 100 % при реальных соотношениях h , T и l [14]. Разработанный и реализованный в электропотенциальном измерителе глубины трещин «ЗОНД ИГТ-98» [15] алгоритм решения обратной задачи электропотенциальной дефектометрии [16] позволил практически полностью скорректировать влияние вариации T и l в широких пределах.

Однако возможная неортогональность плоскости трещины к поверхности, а также кривизна самой поверхности при интерпретации результатов измерения в разработанном алгоритме не учитываются. Вместе с тем, трещины, возникающие, например, при прокатке, в железнодорожных рельсах, как правило, не ортогональны к поверхности, а поверхность контролируемых объектов: труб, валов и т.п. имеет кривизну. В связи с этим вопрос измерения глубины трещин электропотенциальным методом с учетом указанных факторов весьма актуален.

Расчеты проводились методом конечных элементов на основе программного пакета ANSYS. При расчетах межэлектродные расстояния электропотенциального преобразователя (ЭПП) принимались равными $R_T = 20$ мм и $R_P = 2$ мм, что соответствует параметрам ЭПП используемого в приборе «ЗОНД ИГТ-98» и ряде других. Для измерения глубины трещин на вогнутых и выпуклых поверхностях малого радиуса проведено исследование специализированного преобразователя с электродами, установ-

ленными не на одной линии, а по углам трапеции. В качестве информативного сигнала вычислялось относительное напряжение, вносимое дефектом $U^* = (U_r - U_0)/U_0$.

Проведенные исследования позволили количественно оценить погрешность измерения, связанную с влиянием угла наклона трещин и кривизной выпуклой и вогнутой цилиндрической поверхности. Установлено, что дополнительная погрешность, связанная с кривизной контролируемого участка монотонно увеличивается с ростом кривизны поверхности, глубины и длины трещины. В предельных реалистичных случаях дополнительная относительная погрешность достигает 50 %. Показано также, что погрешность измерения глубины трещин электропотенциальным методом без учета влияния отклонения их плоскости от нормали к поверхности дефектного участка весьма существенна. Например, при угле $\alpha = 60^\circ$ между нормалью к плоскости образца и плоскостью трещины и ее глубине $h = 8$ мм, относительная погрешность измерения h составляет 60 %.

Разработаны способы измерения кривизны поверхности контролируемого участка, а также получения информации, достаточной для вычисления глубины и угла наклона трещины с помощью того же самого преобразователя, что и для измерения глубины трещин.

Разработанные алгоритмы интерпретации позволяют измерить не только глубину наклонной трещины, но и угол ее наклона и практически исключить влияние кривизны. Алгоритмы реализованы и апробированы путем модернизации программного обеспечения прибора «ЗОНД ИГТ-98».

Литература

1. **Неразрушающий** контроль: Справочник в 8 томах. Т. 2. / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2006.
2. **Dover W.D., Charlesworth FDW, Taylor K.A., Collins R., Michael D.H.** AC Field Measurement—Theory and Practice, 1980; 222 – 61.
3. **Collins R., Dover W.D., Ranger K.B.** The AC Field Around a Plane Semi-Elliptical Crack in Metal Surface, 1981; 470–9. Collins R. Dover WD, Michael DH. The Use of AC Field Measurement for NDT, 1985; 8: 211 – 65.
4. **Saguy H., Rittel D.** Flaw Detection in Metals by the ACPD Technique: Theory and Experiments. NDT&E International 40 (2007) 505 – 509.
5. **Saguy H., Rittel D.** Bridging Thin and Thick Skin Solutions for Alternating Currents in Crack Conductors. Appl. Phys. Lett. J 2005; 87: 84103 – 84103/3.
6. **Lugg M.C.** Data Interpretation in ACPD Crack Inspection. NDT International 1989; 22(3): 149 – 54.
7. **Dover W.D., Monahan C.C.** The Measurement of Surface Breaking Cracks by the Electrical Systems ACPD/ACFM. Fatigue Fract Eng 1994; 17(12): 1485 – 92.
8. **Dover W.D., Collins R, Michael D.H.** Review of Development in ACPD and ACFM. Br J NDT 1991; 33(3): 121 – 7.

9. **Mirshekar-Syahkal D, Collins R, Michael D.H.** The Influence of Skin Depth on Crack Measurement by the AC Field Technique. *Nondestructive Evaluation* 1982; 3(2): 65 – 76.

10. **Michael D.H., Collins R.** The AC Field Around a Plane Crack in Metal Surface When the Skin Depth is Large. *Nondestruct Eval* 1982; 3(1): 19 – 24.

11. **Bowler J.R., Bowler N.** Theory of Four-Point Alternating Current Potential Drop Measurements on Conductive Plates *Proc. R. Soc. A* 2007 463, 817 – 836.

12. **Hicks M.A. and Pickard A.C.** A Comparison of Theoretical and Experimental Methods of Calibrating the Electrical Potential Drop Technique for Crack Length Determination. *Int. Journ. of Fracture*, 20(1982), 91 – 101.

13. **Shkatov P.N.** Increased Preciseness of Deep Defects Defecting Through Electropotential Method // 7th European Conference on NDT, Copenhagen, 1998.

14. **Шкатов П.Н.** Исследование погрешности измерения глубины трещин электропотенциальным методом // Тезисы докладов 14-ой российской НТК «Неразрушающий контроль и диагностика». М., 1996.

15. **Шкатов П.Н.** Компьютеризированный измеритель глубины трещин «ЗОНД ИГТ-98» // «Контроль. Диагностика» *Машиностроение*. № 2, 1988.

16. **Шкатов П.Н.** Решение обратной задачи электропотенциальной дефектометрии для поверхностной трещины конечной длины // Тезисы докладов 3-ей международной НТК «Компьютерные методы и обратные задачи в неразрушающем контроле и диагностике». М., 2002.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ВИХРЕТОКО-МАГНИТНОГО МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Шкатов П.Н., Мякушев К.В.
МГУПИ, Москва, Россия

В современной практике для неразрушающего контроля изделий из ферромагнитных сталей широко применяются магнитный и вихретоковый методы контроля. Каждый из методов обладает своими преимуществами и недостатками.

Магнитный метод контроля, основанный на регистрации потоков рассеяния, предполагает намагничивание объекта контроля (ОК) до состояния насыщения или близкого к нему. Это сопряжено с необходимостью создания систем намагничивания, зачастую довольно громоздких, особенно при работе с массивными объектами контроля.

Метод вихревых токов лишен этого недостатка, однако не позволяет выявлять дефекты, залегающие на глубине, превышающей глубину проникновения переменного магнитного поля в металл. Глубина проникновения увеличивается со снижением частоты контроля, но следствием этого является резкое снижение абсолютной чувствительности преобразователей.

Существенно улучшить ситуацию позволяет активно развивающийся в последние годы [1 – 4] вихретоко-магнитный (ВМТ) метод, который является комбинацией двух, описанных выше методов. При реализации ВМТ метода в объекте контроля создается постоянное магнитное поле с помощью системы намагничивания и на намагниченный участок ОК воздействует поле возбуждающей обмотки вихретокового преобразователя.

Намагничивание металла применяется не для уменьшения магнитной проницаемости, с целью увеличения глубины проникновения [6], а для использования появляющихся при намагничивании на поверхности металла «магнитных пятен» над дефектными участками. Магнитные пятна образуются из-за вытеснения магнитного потока, перераспределяемого дефектом, в приповерхностные слои. Для получения должного эффекта величина намагничивающего поля должна быть строго определенной [5]. При недостаточной или слишком большой напряженности намагничивающего поля контраст будет недостаточен для надежного считывания границ пятна.

В докладе описаны эксперименты, направленные на изучение взаимодействия поля вихретокового преобразователя с намагниченным участком ферромагнитного ОК с учетом возникающей при намагничивании анизотропии магнитных свойств ОК. Экспериментально и исследовано поведение металла в пределах петли магнитного гистерезиса и построены зависимости обратимой магнитной проницаемости на основе данных о частных циклах перемагничивания. На основе выполненных исследований предложена модель материала ОК, используемая при расчете МВТ устройств методом конечных элементов. Приведены примеры расчетов при вариации режимов намагничивания и параметров вихретокового контроля для ОК с различными типами дефектов.

Литература

1. **Dijkstra F.H., de Raad J.A., Bunisch A.** Magnetic Flux and SLOFEC Inspection of Thick Walled Components. 15th World Conference on Non-Destructive Testing, Roma, 2000.
2. **Dijkstra F.H., de Raad J.A.** NDT: Necessary evil or benefit? Insight. 2002. Vol. 44. No 7. P. 446 – 451.
3. **Shkatov P.** Combining Eddy-Current and Magnetic Methods for the Defectoscopy of Ferromagnetic Materials, Nondestructive Testing and Evaluation. June 2013. Vol. 28. Issue 2. P. 155 – 165.
4. **Пат. РФ № 2442151.** Способ выявления подповерхностных дефектов в ферромагнитных объектах / Клюев С.В., Шкатов П.Н. 2012. Бюл. № 4.
5. **Пат. РФ № 2493561.** Вихретоково-магнитный способ дефектоскопии ферромагнитных объектов / Шкатов П.Н., Мякушев К.В. 2013. Бюл. № 26.
6. **Sadek H.M.** NDE technologies for the examination of heat exchangers and boiler tubes – principles, advantages and limitations // Insight. March 2006. Vol. 48. No 3. P. 181 – 183.

СЕКЦИЯ 3. АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НК И ТД

Руководители секции: Шевалдыкин В.Г., Бобров В.Т., Самокрутов А.А.

ОСОБЕННОСТИ ЭМА ВОЗБУЖДЕНИЯ И ПРИЕМА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ОБЪЕМНЫХ ВОЛН В ПОСТОЯННОМ И ИМПУЛЬСНОМ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Алехин С.Г.¹, Бобров С.В.²

¹(ООО «АКС»), Россия, Москва;

²(НУЦ «Качество»), Россия, Москва

Для возбуждения и приема ультразвуковых продольных и сдвиговых горизонтально-поляризованных (SH) волн с радиальной и линейной поляризацией разработаны малогабаритные электромагнитноакустические (ЭМА) преобразователи (ЭМАП) с магнитной системой (пат. РФ № 2350943) на основе редкоземельных металлов [1]. Достоинством ЭМАП с магнитной системой является высокое значение индукции на поверхности объекта контроля (ОК). Основной их недостаток – эффект сильного притяжения к ферромагнитным ОК, к которым относится большинство черных сталей.

В докладе [2] были представлены результаты экспериментального исследования ЭМА преобразования в импульсном магнитном поле, подтвердившие перспективность использования импульсного подмагничивания при ЭМА возбуждении и приеме SH волн в портативных приборах.

В работе [3] показано преимущество использования импульсного подмагничивания для контроля точечной сварки.

Для решения задачи создания ручного ЭМА толщиномера с импульсным подмагничиванием в работе [4] была определена конфигурация импульсного электромагнита, выполнены теоретические и экспериментальные исследования динамики формирования магнитного поля в ОК из неферромагнитных и ферромагнитных металлов и сплавов, а также влияния зазора на конфигурацию и динамику магнитного поля. Приведены рекомендации по выбору конфигурации сигнального индуктора для возбуждения SH волн с радиальной поляризацией. Экспериментальные исследования подтвердили высокую эффективность намагничивающей системы при работе на неферромагнитных и ферромагнитных металлах и сплавах. Значения индукции импульсного магнитного поля составляли для разных материалов от 0,7 до 2,2-х тесла. При использовании технологии импульсного подмагничивания уровень принятого эхо-сигнала может существенно (на 10 дБ) превышать значения, достижимые для магнитных систем на основе постоянных магнитов при прочих равных условиях. Это достигается за счет того, что при импульсном подмагничивании сигнальный индуктор

имеет меньшую толщину защитного слоя, так как не испытывает серьезных механических нагрузок в виде мощного примагничивания к ОК по сравнению с ЭМАП на основе постоянных магнитов.

По результатам исследований были разработаны и изготовлены ЭМА преобразователи с постоянным и импульсным подмагничиванием для возбуждения продольных и сдвиговых ультразвуковых волн, которые используются с ручными ЭМА толщиномерами А1270 и А1270 РМ (с импульсным подмагничиванием), которые обеспечивают измерение толщины и анизотропии проката из сплавов алюминия и ряда других металлов и сплавов и контроля точечной сварки.

В докладе приводятся результаты моделирования магнитных систем и исследования особенностей ЭМА для возбуждения сдвиговых и продольных ультразвуковых волн в постоянном и импульсном магнитных полях.

Литература

1. **Алехин С.Г., Самокрутов А.А., Бобров В.Т., Бобров С.В., Сергеев К.Л.** Моделирование магнитных систем ЭМА преобразователей для возбуждения ультразвуковых волн // Контроль. Диагностика. 2013. № 7. С. 12 – 18.
2. **Shevaldykin V.G., Bobrov V.T., Alekhin S.G.** EMAT Transformation in Pulsed Magnetic Field and its Use in Portable Instruments for Acoustic Measurements: 16th World Conference on Nondestructive Testing. Montréal, Canada. August 30 – September 3, 2004. Book of Abstracts. TS3.24.3. P. 88.
3. **Бобров В.Т., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Козлов В.Н., Бобров С.В.** К выбору методологии ультразвукового контроля точечной сварки // Неразрушающий контроль и техническая диагностика: тезисы докладов 18-й Всероссийской конференции с международным участием. Н. Новгород: Машиностроение, 2008. С. 75–76.
4. **Алехин С.Г.** Толщинометрия металлоконструкций на основе электромагнитно-акустического преобразования в импульсном магнитном поле: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М.: ЗАО «НИИИИ МНПО «Спектр», 2013. 34 с.

РАСЧЕТ КРИВЫХ ВЕРОЯТНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ТРУБОПРОВОДОВ АЭС

Бадалян В.Г., Самарин П.Ф.
НПЦ «ЭХО+», Москва, Россия

Оценка достоверности контроля основана на анализе кривых зависимости вероятности обнаружения дефектов от их размеров $POD(a)$ (например, длины или глубины). Вместе с тем, кривые зависят от многих других

физических и эксплуатационных параметров, таких как тип дефекта, материал и геометрия объекта контроля, метод контроля и др.

Получение статистически достоверных кривых $POD(a)$ только из результатов экспериментов – задача очень трудоемкая. Например, для вероятности выявления дефекта определенного размера 0,9 в 95 % доверительном интервале, необходимо не менее 29 независимых измерений [1]. Поэтому, использование моделирования в целях построения кривой $POD(a)$ может оказаться очень полезным.

В настоящей работе представлен пример моделирования для получения кривой $POD(a)$ для поперечных дефектов в сварном соединении Ду300 [2] (рис. 1). Расчеты выполнялись с применением программного средства CIV4, разработанного компанией комиссариатом по атомной энергии (ФРАНЦИЯ) и аттестовано в атомной энергетике РФ НПЦ «ЭХО+» [3]. При моделировании учитывались особенности локализации поперечных дефектов, их характерные размеры и выбранная схема ультразвукового контроля. Для обоснования корректности использования моделирования на CIV4 было экспериментально исследовано влияние анизотропии скорости распространения УЗ вдоль и перпендикулярно оси сварного соединения Ду300. Было показано, что ошибка измерения координат дефекта вдоль и поперек оси СС из-за влияния анизотропии в 5 – 7 раз ниже случайной ошибки измерений и для действующей схемы измерений, анизотропией распространения скорости звука вдоль СС можно пренебречь. Результаты измерений амплитуд эхосигналов от моделей дефектов (пазов), выполненных в реальном сварном соединении Ду300 тест-образца, показали, что амплитуд эхосигналов нелинейно зависит от высоты дефекта. Поэтому для построения кривой POD было выбрано дискретное распределение (данные «да/нет») при котором критерий выявления дефекта определяется по амплитуде сигнала: превышает сигнал заданный порог, соответствующий уровню структурных акустических шумов – выявлен или нет – не выявлен.

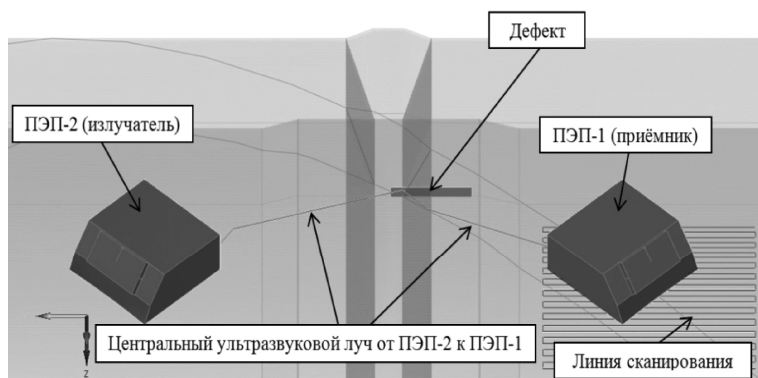


Рис. 1. Схема контроля, использованная при расчетах на ПС CIV4

По такому же критерию определяется факт обнаружения дефекта в экспериментах. При автоматизированном вычислении кривой *POD* с применением CIVA (рис. 2), случайным образом (по нормальному закону) варьировались ориентация дефектов (наклон, азимутальная ориентация).

Сопоставление результатов моделирования *POD* с экспериментальными результатами ультразвукового контроля для пазов различной высоты и их ориентации дало хорошее согласие (рис. 3).

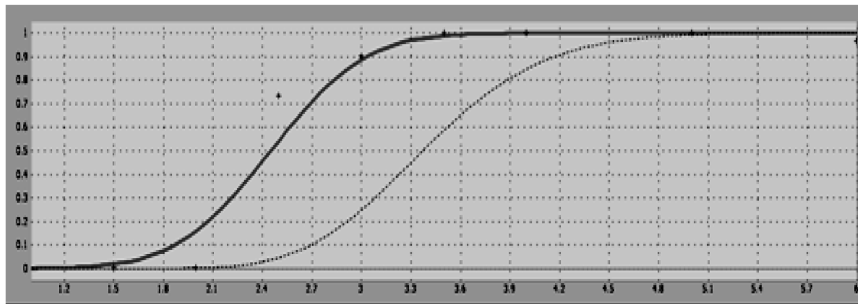


Рис. 2. Кривая *POD(a)*, рассчитанная с применением CIVA для прямоугольных дефектов в сварном соединении Ду300:

сплошная линия – кривая *POD*; пунктирная – нижняя граница 95 % доверительной вероятности для *POD*. В расчетах изменялась высота, наклон и азимут дефектов

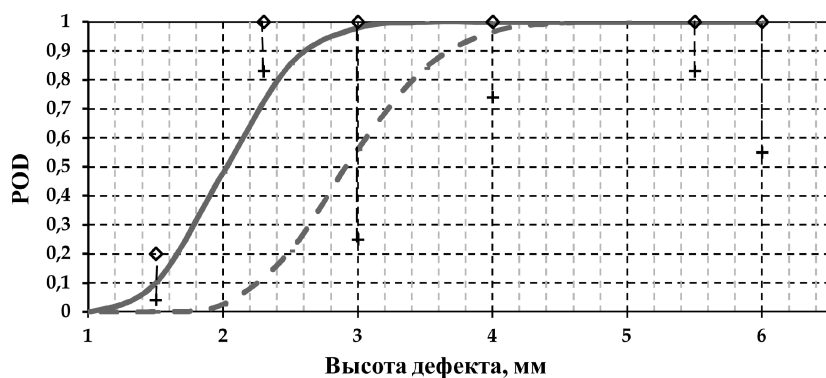


Рис. 3. Кривая *POD*, рассчитанная при учете изменения только азимутального угла в пределах $\pm 3^\circ$:

сплошная линия – кривая *POD*; пунктирная – нижняя граница 95 % доверительной вероятности для *POD*; точки – экспериментальные данные, + – нижняя граница 95 % доверительной вероятности для экспериментальных точек (биномиальное распределение)

Литература

1. **Georgiou G.** Probability of Detection (PoD) curves – Derivation, Applications and Limitations. HSE Research Report 454, 2006.
2. **Методика** автоматизированного ультразвукового контроля кольцевых сварных соединений аустенитных трубопроводов Ду300 реакторов РБМК с применением системы Авгур 5.2 (с дополн.) (МА5-АЭ2-Т2М/2-К-06), М., 2006.
3. **Аттестационный** паспорт программного средства № 329 от 18.04.2013. Ростехнадзор, ФБУ «НТЦ ЯРБ».

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «CIVA»

Бадалян В.Г.

НПЦ «ЭХО+», Москва, Россия

Приведены результаты использования ультразвукового модуля программного комплекса «CIVA» как вспомогательного средства для разработки и аттестации методик ультразвукового неразрушающего контроля.

Эффективность моделирования различных акустических схем контроля анализировалось на примере акустической схемы тандем. Показана корректность качественного описания результатов регистрации эхосигналов, полученных при расчетах и в экспериментах. Результаты измерений амплитуд эхосигналов, полученных в экспериментах, совпадают с расчетами с точностью до 3 дБ.

Показана эффективность моделирования при выборе параметров методики УЗК в объекте сложной формы с применением антенных решеток.

На примере моделирования методики ультразвукового контроля в объекте, содержащем сварное соединение, цилиндрическую околошовную зону с одной стороны и коническую околошовную зону – с другой, проанализирована возможность выявления дефектов, расположенных в области контроля и определены оптимальные положения антенной решетки при контроле. Результаты экспериментов и расчетов, выполненных для тест-образца с моделями плоскостных и объемных дефектов, показали, что выбранная схема контроля обеспечивает обнаружение всех моделей дефектов с высоким отношением сигнал/шум, большим 6 дБ. Только плоскостная несплошность, расположенная в корне СС имеет отношение сигнал/шум 4 дБ, что позволяет обнаруживать эту несплошность только при повышенной чувствительности аппаратуры контроля.

Выполнены расчеты, анализирующие возможность выявления дефектов, локализованных в условиях наименее благоприятных для их обнаружения (модель наихудшей дефектной ситуации).

Для этого рассмотрены характеристики метода контроля кольцевых СС приварки коллекторов теплоносителя к корпусу парогенератора с применением антенных решеток. Характерным местом расположения несплошностей типа, коррозионных трещин, в этом объекте является область галтельного перехода. В ней, во время эксплуатации, образуется значительное количество коррозионных язв, из которых растут вертикальные плоскостные дефекты. Взаимное положение и размеры коррозионной язвы и плоскостной несплошности существенно влияют на относительную амплитуду эхосигналов от язвы и несплошности, затрудняя, в ряде случаев, возможность выявления плоскостной несплошности и оценку ее параметров. Показано, что амплитуда дифракционных сигналов от верхнего конца трещины не зависит от высоты трещины; амплитуда эхосигналов от моделей «коррозионных язв» слабо зависит от их размеров; амплитуда сигналов от нижнего конца трещины, расположенной на вершине модели «коррозионной язвы» выше, чем в других случаях за счет затенения донной поверхностью корня трещины. При анализе данных недостаточно ориентироваться только на эхосигналы от «коррозионной язвы» и от корня трещины, так как амплитуда эхосигнала от язв больше (на почти 4 дБ – для язвы высотой 2 мм и более чем на 12 дБ – для язвы высотой 6 мм) независимо от положения трещины.

ПОДПОВЕРХНОСТНЫЕ И ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОЛНЫ В ОБЪЕКТАХ С ПОВЕРХНОСТНЫМ УПРОЧНЕННЫМ СЛОЕМ

Баев А.Р.¹, Майоров А.Л.¹, Гуделев В.Г.², Коновалов Г.Е.¹, Ропот П.И.²
¹ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси», Минск, Беларусь;
²ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси»,
Минск, Беларусь

При ультразвуковом контроле глубины h упрочненного поверхностного слоя (УПС) стальных изделий ТВЧ-закалкой, лазерным отжигом, цементированием, и др. используется корреляция между акустическими и физико-механическими свойствами металла. На основе учета этой связи предложен ряд способов УЗ контроля по данным скорости поверхностной (ПАВ) C_R и поперечной C_T волны, положению координат максимумов рефрагирующей поперечной подповерхностной волны (ППВ) [1 – 3]. Причем в работе [2] контролируемая глубина УПС h составляла десятки мм, а $h_T = h/\lambda_T \sim 10$ и более, где λ_T – длина ППВ. При контроле объектов с задаваемой толщиной УПС от десятых долей мм до $h \sim 1 \dots 2$ мм по данным C_R или C_T , величина h_T и h_R может изменяться в диапазоне от нуля до нескольких единиц, что сопровождается изменением эффективных упругих характеристик и плотности звукопреломляющего материала, контактирующего с

ПЭП, что сказывается на амплитудных и спектральных параметрах зондирующего импульса. Исследование влияния глубины УПС на ход зависимостей A_R , A_T и $A_{TR} = A_T/A_R$ от частоты сигнала и длины акустической базы l весьма важно для оптимизации условий определения глубины УПС по данным C_T и C_R .

Объект исследований представляет собой набор образцов в виде параллелепипеда с цементацией УПС на глубину от нуля до 1,5 мм, чему соответствует варьируемый диапазон $h_R = 0...5,1$ при изменении рабочей частоты в диапазоне $f = 1,8...10$ МГц. Для излучения-приема ПАВ и ППВ используются наклонные ПЭП с твердотельной и жидкой призмой, выполненные с возможностью изменения угла призмы широком диапазоне, включая углы $\beta_{R,T} = \arcsin(C_1/C_{R,T})$, где C_1 – скорость УЗК в призме ПЭП. На основе ПЭП с фиксированными и переменными углами призмы реализуется теневого и эхо-режим прозвучивания, где в качестве отражателя ПАВ и ППВ используется одна из граней образца с УПС. Дополнительно для возбуждения-приема ПАВ используется импульсно-лазерный генератор, пятно лазерного луча которого имеет форму полосы с изменяемой шириной. Исследования выполнены на компьютеризированной установке.

В результате исследований установлено, что (рис. 1 и 2), нормализованная функция $A_R(\beta)$ имеет максимум в окрестности характерного β_R , возрастающего с ростом безразмерной глубины УПС, что обусловлено уменьшением эффективной скорости ПАВ. Это угловое смещение достигает $\Delta\beta \sim 2...2,5^\circ$ при $h_R \sim 2,5$, а наибольшее расхождение нормализованных кривых $A_R(\beta)$, характеризуемых коэффициентом $\xi_R = 20\log(A_{RV}/A_{R0})$, может достигать $\sim 10...15$ дБ при $\beta_{R0} > \beta_R > \beta_{RV}$, где второй индекс соответствует

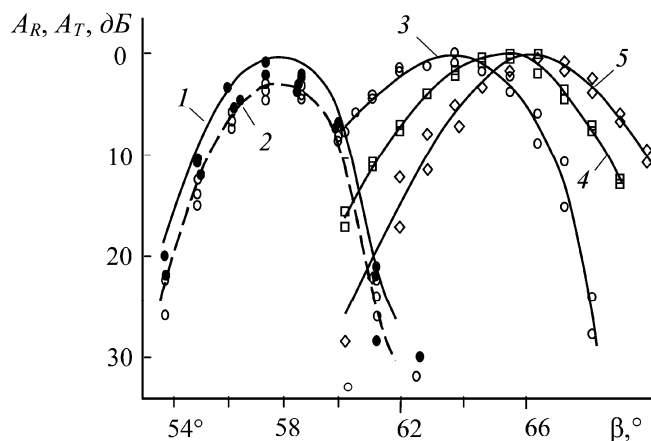


Рис. 1. Амплитуда ППВ (1, 2) и ПАВ (3 – 5) от угла призмы β в режиме отражения: $h_R = 2,5$ (1, 2); 0 (3); 0,9 (2, 5); акустическая база l , мм = 40 (1) и 80 (2); $f = 1,8$ МГц

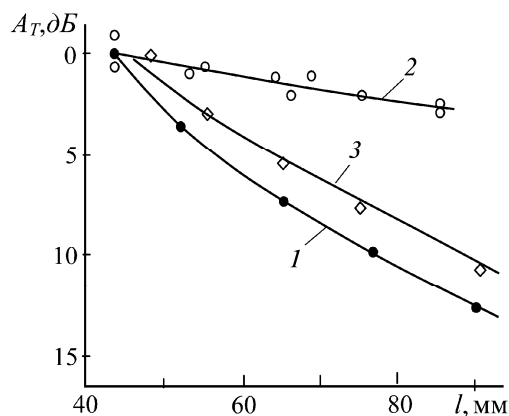


Рис. 2. Амплитуда ППВ от акустической базы l в режиме прохождения f , МГц = 5 (1, 2); 1,8 МГц (3): $h_R = 0$ (1); 2,5 (2); 0,9 (3)

углу максимума амплитуды ПАВ для сырого (0) или упрочненного (У) образца соответственно. Отклонение угла призмы от оптимального значения сопровождается не только уменьшением амплитуды, но и изменением спектра сигнала, что вызвано наличием разницы между скоростью ПАВ и скоростью движения следа фронта акустического луча, падающего на границу сред и равного $\Delta C \approx C_R - C_1 \sin[\arcsin(C_1/C_R) + \Delta\beta]$. Таким образом, при проведении УЗ-контроля глубины УПС на одной или на характерных частотах (по дисперсионной зависимости) следует учитывать влияние указанные факторов на измерительный процесс и, по возможности, проводить подстройку угла призмы ПЭП на максимум излучаемого (принимаемого) сигнала.

В ряде случаев улучшение условий излучения-приема ПАВ может быть достигнуто при установке угла призмы в некоторое постоянное положение $\beta_{R1} < \beta_R < \beta_{R2}$, где индексы 1 и 2 соответствуют условиям настройки ПЭП на максимум амплитуды излучения (приема) ПАВ в объектах с регламентированной нижней и верхней границей допустимых значений глубины УПС соответственно. Так как сам ход зависимостей $A_R(\beta)$ и $A_T(\beta)$, включая положение их максимумов, обусловлены свойствами поверхностного слоя и его глубиной, то, используя указанные зависимости и априорную информацию, представляется возможным не только повысить достоверность определения h по данным скорости ПАВ, но и оценить глубину УПС на основании амплитудно-угловых зависимостей. Причем достоверность оценки h выше, если таких зависимостей несколько, и они получены на разных и частотах. Однако, для реализации этой методики необходима априорная информация о шероховатости поверхности и ее твердости в окрестности $z = 0$, более точная ($\sim 0,1^\circ$) установка угла призмы излучающего и(или) приемного ПЭП. Измерения могут проводиться как в режиме про-

хождения, так и отражения. Последний вариант является наиболее простым и удобным, так как используется всего лишь один ПЭП с перестраиваемым углом призмы.

Изменение угла падения волны в призме ПЭП, сопровождающееся перераспределением вклада энергии падающей продольной волны в ПАВ и ППВ, существенно зависит от глубины УПС. Так, необходимо отметить, что при $\beta < \beta_R$ наряду с ПАВ становится заметной возбуждаемая сопутствующая ППВ, и A_{TR} достигает максимума в окрестности второго критического угла. Причем в отсутствие УПС изменение угла призмы от β_R до β_2 хоть и сопровождается ростом A_{TR} , но, тем не менее, превалирует (практически на порядок и более) поверхностная мода. Если $\beta \sim \beta_2$, $h_R \sim 1$, то $A_R \sim A_T$, но уже при $h_R \approx 2,5$ по амплитуде превалирует подповерхностная поперечная мода. Установлено, что в этом случае (рис. 2), зависимости A_{TR} и A_T от длины акустической базы L , полученные в режиме прохождения и отражения, представляют собой монотонно убывающие функции, эффективный угол наклона логарифмических зависимостей которых к оси l уменьшается по мере роста глубины УПС до некоторого характерного значения h_R^* . По оценочным данным при $h_R = 2,7 \dots 2,9$ амплитуда A_T слабо (в пределах 2...3 дБ) зависит от длины акустической базы, варьируемой в диапазоне от 50 до 150 мм, что обусловлено проявлением эффекта рефракции и возникновением своеобразного звукового канала. Если же $h_R > h_R^*$, то в окрестности характерных значений l_i появляются экстремумы, положение которых зависит от глубины УПС, что представляет интерес для оценки достаточно больших глубин УПС [2]. В то же время проявление эффекта рефракции может сказаться на точности измерений скорости УЗК, определяемой на максимальной частоте дисперсионной зависимости в указанной выше области h_R . Проведенные дополнительные исследования с использованием оптоакустического возбуждения УЗК и анализа его спектра показали принципиальную возможность повысить информативность измерений малых глубин УПС.

Таким образом, полученные результаты исследований представляют интерес применительно к разработке ряда методик контроля поверхностных упрочненных слоев металлоизделий акустическими методами.

Литература

1. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. Т. 3: Ультразвуковой контроль / под ред. чл.-корр. РАН В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2004. 832 с.
2. Басацкая Л.В., Вopilкин А.Ч., Шишов А.П. Дифракция ультразвуковых волн в поверхностно-закаленном слое металлов и метод измерения глубины закаленного слоя // Дефектоскопия. 1988. № 7. С. 54 – 65.
3. Баев А.Р., Майоров А.Л., Тищенко М.А. Ультразвуковой метод анализа поверхностного упрочнения металлических изделий // Литье и металлургия. 2010. № 4. С. 167 – 271.

РАССЕЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ НЕСПЛОШНОСТЬЮ ВОЛН РЭЛЕЯ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ИМПУЛЬСНО-ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Баев А.Р.¹, Кулак Г.В.², Гуделев В.Г.³, Митьковец А.И.³, Матвеева, А.Г.²

¹*Институт прикладной физики НАН Беларуси;*

²*Мозырский государственный педагогический университет;*

³*Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси*

Одно из перспективных направлений неразрушающего контроля объектов сложного профиля и расположенных в труднодоступных местах заключается в сочетании импульсно-лазерного возбуждения упругих мод и приема их контактными преобразователями (ПЭП) [1 – 3]. В настоящей работе теоретически и экспериментально изучены особенности трансформации и рассеяние рэлеевских или поверхностных волн (ПАВ) при приближении и пересечении пятном лазерного луча (ПЛЛ) поверхностного дефекта в виде несплошности разной геометрии. Именно в этом случае представляется возможным существенно повысить эффективность выявления поверхностных дефектов [1 – 3]. В настоящей работе обращено внимание на ряд особенностей возбуждения ПАВ указанным выше образом, выявить влияние геометрии ПЛЛ и несплошности на эффективность рассеяния волн.

В качестве объекта экспериментальных исследований использованы стальные образцы толщиной 6,5 мм с реальными усталостными трещинами шириной $\delta \approx 0,5, 4, 8$ мкм и глубиной $h \approx 350 \dots 500$ мкм. Моделирование поры произведено сверлением образца на глубину $h = 2$ мм и диаметром 1 мм. Пятно луча, формируемого в виде вытянутой полосы либо круга (с варьируемым поперечным сечением) перемещается по нормали к трещине вдоль координаты x . Режим возбуждения ПАВ термоупругий, частота следования лазерных импульсов 10 Гц, длина волны лазерного излучения 1,06 мкм, а его длительность $\tau \sim 20$ нс. Возбуждаемые ПАВ принимаются пьезопреобразователем с рабочей частотой 2,73 МГц, сигнал с которого подается на вход осциллографа Tektronix TDS 3052B для анализа его амплитуды и спектра. Проведено экспериментальное исследование безразмерной ширины ПЛЛ $d^* = d/\lambda_{\text{ПАВ}}$, и положения ПЛЛ при перемещении относительно координаты центра трещины (или модельной поры) $x = 0$, где $\lambda_{\text{ПАВ}}$ – длина рэлеевской волны.

Результаты экспериментального исследования, поясняемые рис. 1, показали следующее. Так, при перемещении пересечения ПЛЛ через трещину наблюдается существенное изменение не только амплитуды, но и «вступительной» части импульса, занимающей временной интервал его осцилляции $\tau = (2 - 3)f^{-1}$, где f – характерная частота волны. Этот эффект сопро-

вождается изменением спектра импульса, а также появлением «сателлитов» ПАВ, имеющих значительно меньшую амплитуду. Проведенные дополнительные исследования показали, что природа этих сателлитов обусловлена трансформацией ПАВ на вершине трещины в поперечную моду, которая, в свою очередь, при переотражении между стенками образца служит источником трансформируемых обратно ПАВ. Зависимость амплитуды волны от расстояния до трещины $A(x)$ имеет ярко выраженный максимум, достигаемый при расположении центра ПЛЛ в окрестности трещины $x = 0$. Установлено, что максимальное увеличение амплитуды сигнала, характеризующее амплитудным коэффициентом $\varepsilon_A = A_{\max} / A_x$, достигает 7–8 раз, если ширина ПЛЛ d выбрана оптимальной (резонансной) величины, характеризующейся безразмерным параметром $d^* = d / \lambda_{\text{ПАВ}} = 1,8 \dots 2,2$, где A_x соответствует минимуму амплитуды сигнала при положении центра ПЛЛ в окрестности $-4 \leq x \leq 4$ мм. Амплитудные же изменения сигнала при перемещении ПЛЛ через трещину с предельным раскрытием (шириной $\delta \sim 0,5$ мкм) и длиной ~ 3 мм составили всего 25...40 %. Однако, при этом признаком, характеризующим наличие дефекта, может служить форма «вступительной» части осцилляции импульса, обусловленная сложным характером формирования поля ПАВ в окрестности трещины. Необходимо отметить, что ранее в работе [1] при изучении подобного эффекта на образце с длинной искусственной трещиной шириной $\delta = 50$ мкм влияние параметра d^* на амплитуду возбуждаемой ПАВ не изучалось, а зафиксированное «усиление» амплитуды ПАВ составило всего $\varepsilon_A \sim 2 \dots 3$.

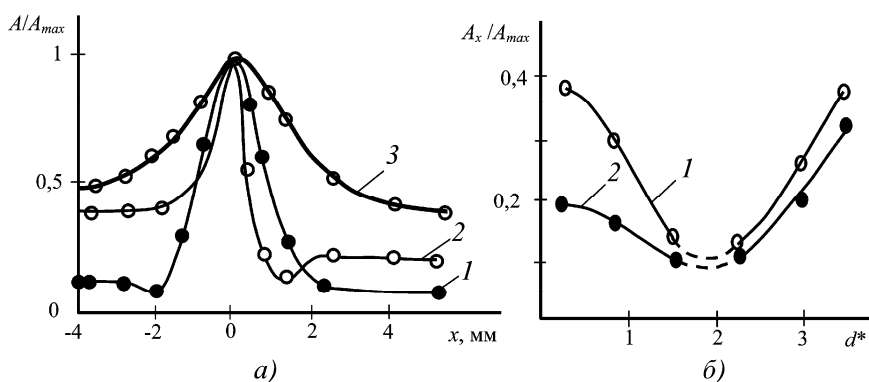


Рис. 1. Амплитуда ПАВ в зависимости от положения пятна лазерного луча относительно трещины (а) и от безразмерной ширины пятна d^* (б):
 а – $d^* = 2,2$ (1); 0,2 (2); 5 (3); б – значение A_x взято при $x = -4$ мм (1) и 4 мм (2);
 ширина трещины $\delta \approx 4$ мкм, а глубина $h = 400 \dots 450$ мкм

Нами также получены зависимости $A(x)$ и $\varepsilon_A(d^*)$ для случая, когда ПЛЛ имеет форму круга, а несплошность – цилиндрическое углубление диаметром 1 мм. Как и в предыдущем случае, при возбуждении ПАВ варьировался диаметр лазерного пятна. Весьма интересным с точки зрения механизма ОА-взаимодействия и важным для практики является тот факт, что при отношении площади несплошности (модельной поры) S_D к площади S_{Π} пятна лазерного луча $\sim 4\%$ величина ε_A достигает $\sim 5 \dots 6$. Причем чувствительность ненаправленного приемника слабо зависит от положения ПЛЛ, попадающего и «захватывающего» несплошность. Это свидетельствует о возможности высокопроизводительного контроля поверхности объекта указанным методом при сохранении его высокой чувствительности. Результаты экспериментальных исследований сопоставлены с данными теоретических расчетов. При этом, модельная несплошность представлялась в виде углубления с поперечным сечением в виде трапеции с изменяемыми геометрическими размерами. Падающая рэлеевская УЗ волна частотой f направляется на дефект и рассеивается на нем в прямом ($x_1 > 0$) или обратном ($x_1 < 0$) направлении. С использованием двумерной функции Грина в плоскости x_1x_2 (в системе координат $x_1x_2x_3$) амплитуду рассеянной ПАВ можно найти из выражения:

$$U_{Ri}^{sc}(r') = - \int_S n_p(r') C_{jpmn} \frac{\partial}{\partial x_n} G_{im}(r, r') [U_{Rj}(r)] dS_r,$$

где n_p – компоненты единичного вектора нормали к поверхности (S) несплошности; C_{jpmn} – упругие модули материала; $[U_{Rj}(r)]$ – компоненты смещения в области открытой трещины, индуцированные ПАВ Рэлея.

При численных расчетах применялся алгоритм быстрого преобразования Фурье и метод сплайн-интерполяции. Сравнительный анализ параметров возбуждаемых и рассеянных поверхностной несплошностью рэлеевских волн, полученных расчетным и опытным путем, показал их неплохое качественное соответствие.

Литература

1. **Sridhar Krishnaswamy**. Theory and Application of Laser-Ultrasonic Techniques, in Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, V. 20A, Thompson, D.O. and Chimenti, D.E., Eds., Plenum Press, New York, 2003. P. 436 – 492.
2. **Гусев В.Э., Карабутов А.А.** Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991. 304 с.
3. **Баев А.Р., Гуделев В.Г., Асадчая М.В., Митьковец А.И., Костюк Д.А.** Отражение ОА-сигнала от неоднородной границы // Актуальные

проблемы прочности: материалы 50 Междунар. научного симпозиума, г. Витебск, ИТА НАН Беларуси, 27 сентября – 1 октября 2010 г. – С. 19 – 21.

4. Буденков Г.А., Недзвецкая О.В. Динамические задачи теории упругости М.: Физматлит, 2004. 135 с.

ОПЫТ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ КОМПОЗИТНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА АЭС С ВВЭР-440

Базулин А.Е., Самарин П.Ф., Тихонов Д.С.
ООО «НПЦ «ЭХО+», Москва, Россия

В докладе изложен опыт ООО «НПЦ «ЭХО+» в разработке методик и средств автоматизированного ультразвукового контроля (АУЗК) разнородных сварных соединений реакторной установки ВВЭР-440, в том числе с применением технологий ультразвуковых фазированных решеток.

Разработанные в 2004 – 2008 гг. методики АУЗК с использованием системы АВГУР 5.2 для контроля разнородных однотипных сварных соединений Ду1100 (приварки патрубка парогенератора к переходному кольцу) и сварных соединений № 10 (приварки переходной втулки к корпусу реактора) для РУ ВВЭР-440 показали высокую эффективность. Получаемые в результате контроля когерентные изображения дефектов дают возможность определять их реальные геометрические размеры [1], что является необходимым условием для выполнения прочностных расчетов.

В 2012 и 2013 гг. по запросу Кольской АЭС были разработаны методики и средства ультразвукового контроля разнородных сварных соединений приварки переходников патрубков сброса и впрыска компенсатора объема 1 и 2 очереди, системы аварийного охлаждения зоны корпуса реактора 2 очереди. Данные объекты контроля характеризуются сложной геометрией узла: наличие внутренних и наружных конусных переходов, стесненные условия доступа для установки сканирующего устройства. Сварные соединения имеют толщину от 10 до 55 мм. Особенность разработки состоит в отсутствии норм оценки качества для таких объектов контроля.

Для выполнения АУЗК применяются антенные решетки с эффективной частотой 2,25 МГц, 16 элементов, шаг между элементами 1 мм. Выполняются несколько проходов при сканировании по окружности в зависимости от толщины объекта и наличия места для установки призмы с антенной решеткой. Для выявления поперечно ориентированных дефектов в околосшовной зоне применяется схема с использованием поперечных волн, излучаемых антенной решеткой, которая установлена на призму под углом 0° к оси сварного соединения и качающая луч в дополнительной плоскости (рис. 1). Для проведения сканирования применяются специализированные сканирующие устройства, с набором сменных кольцевых треков (рис. 2).

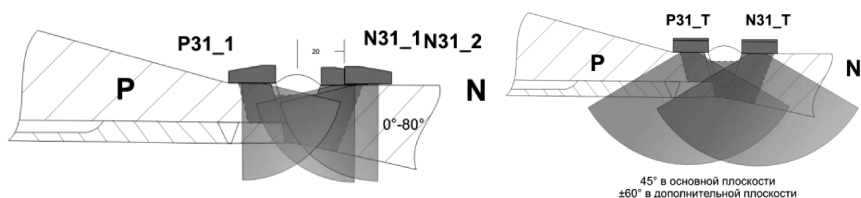


Рис. 1. Пример схемы контроля одного из разнородных сварных соединений



Рис. 2. Сканирующие устройства, размещенные на патрубках

При отсутствии возможности выполнить зачистку поверхности в области валика усиления сварного шва, в объеме, необходимом для установки призмы, методикой предусмотрено использование гибкого кремнийорганического полимера, который обеспечивает акустический контакт на неровной поверхности [2]. Проведены исследования, показавшие эффективность данного подхода для выявления дефектов в объектах с неровной наружной поверхностью (рис. 3).

Испытания проводились в соответствии с порядком, изложенным в РД ЭО 0487 [3] с применением математического моделирования и выполнением контроля испытательных образцов, содержащих искусственные несплошности (непровары, пазы) и показали соответствие требованиям технического задания при выявлении несплошностей – минимально фиксируемая несплошность эквивалентная боковому отверстию диаметром 3 мм, зона контроля, включающая наплавленный металл и околошовную зону.

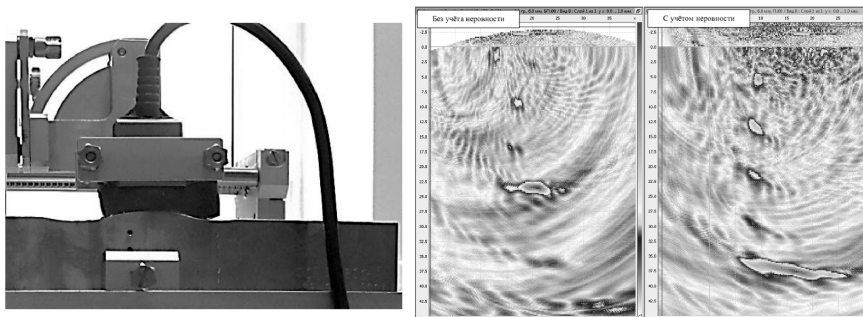


Рис. 3. Слева антенная решетка на задержке из полимера, в центре изображение боковых отверстий, получаемое без учета профиля наружной поверхности, справа изображение с учетом профиля наружной поверхности

Литература

1. **Badalian V.G., Vopilkin A.Kh., Samarin P.F., Tikhonov D.S.** Ultrasonic Testing of Austenitic Welds at the Russian NPP: 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25 – 28 Oct. 2008, Shanghai, China. P. 254.
2. **Базулин Е.Г., Рухайло Н.А.** Определение профиля поверхности объекта контроля при автоматизированном неразрушающем ультразвуковом контроле в иммерсионном режиме и восстановление изображений дефектов методом SAFT // Дефектоскопия. 2012. № 8. С. 16 – 29.
3. **РД ЭО 0487–05.** Типовые требования к порядку разработки технического задания, проведению испытаний и условиям применения средств и методик эксплуатационного неразрушающего контроля на объектах использования атомной энергии.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ПОЛУАВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СПЛОШНАЯ ТОЛЩИНОМЕТРИЯ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Базулин А.Е.¹, Бенитес Х.², Пронин В.В.¹, Тихонов Д.С.¹, Шнель О.О.³

¹ООО «НПЦ «ЭХО+», Москва, Россия;

²DEKRA Industrial AB, Швеция;

³«Ленинградская атомная станция», Россия

Основанием начала работ по теме «ультразвуковая сплошная толщинометрия» (УЗСТ) стали случаи эрозионно/коррозионного износа трубопроводов, в том числе, разрыв трубопровода в турбинном отделении АЭС Михама (Япония) в 2004 г. [1].

По данной теме в 2013 г. ООО «НПЦ «ЭХО+» совместно с Dekra Industrial AB были разработаны и испытаны методики и средства контроля по заказу Ленинградской АЭС (ЛАЭС):

– «Методика полуавтоматизированного измерения толщины стенок трубопроводов питательной воды диаметром от 159 до 426 мм методом ультразвукового контроля с применением антенных решеток»;

– «Методика полуавтоматизированного измерения профиля донной поверхности кольцевых сварных соединений трубопроводов питательной воды диаметром от 159 до 426 мм методом ультразвукового контроля с применением антенных решеток».

При разработке методик учитывались требования ПНАЭГ-7-031–91 [2].

Кроме того, по заказу ЛАЭС были разработаны два сканера:

1. Однокоординатный сканер, обеспечивающий перемещение двух антенных решеток (АР) вдоль окружности трубопровода;

2. Двухкоординатный сканер на магнитных колесах обеспечивающий перемещение одной АР, реализующий сплошное измерение толщины на площади от 250×250 мм.

Измерение толщины стенок трубопроводов проводится с использованием технологии ультразвуковых фазированных АР эхо-импульсным ультразвуковым методом, с контактным способом ввода ультразвука с наружной поверхности трубопровода с использованием полуавтоматизированных сканирующих устройств. В процессе измерений применяются антенные решетки, установленные на плоские задержки (призмы), контактная поверхность которых имеет вогнутую поверхность (притерта) под окружность трубопровода. Приоритетное направление сканирования – вдоль оси трубопровода с целью реализации стандартных карт измерения толщины, действующих в атомной энергетике (рис. 1). В процессе регистрации данных используется продольная волна, сфокусированная на номинальную толщину объекта контроля, и электронное сканирование, обеспечиваемое при подключении к дефектоскопу. Рабочая частота АР составляет $5,0 \pm 0,5$ МГц. Результатом ультразвуковой сплошной толщинометрии является построение карты толщины объекта контроля. На рисунке 2 показан пример построенной карты толщины испытательного образца.

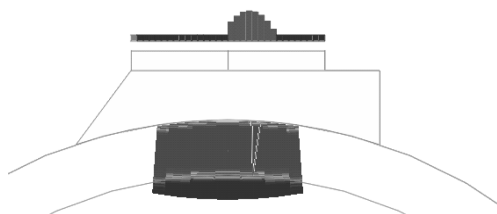


Рис. 1. Электронное сканирование вдоль апертуры АР

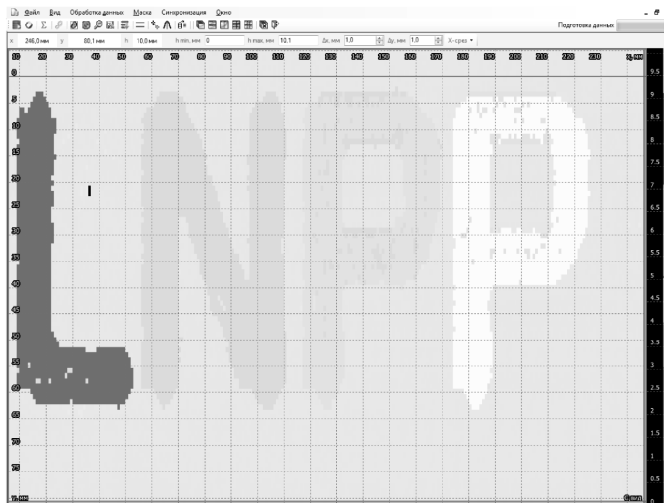


Рис. 2. Пример карты толщины

Измерение профиля донной поверхности проводится с использованием технологий ультразвуковых фазированных антенных решеток ультразвуковым методом времяпролетной дифракции (TOFD), с контактным способом ввода ультразвука с наружной поверхности трубопровода с использованием полуавтоматизированных сканирующих устройств. При контроле применяются АР и призмы, формирующие продольную волну и обеспечивающие при подключении к дефектоскопу режим электронного сканирования (рис. 3). Параметры закона фокусировки АР и расстояние между призмами (PCS) выбираются в зависимости от толщины объекта контроля. Для вычисления толщины предварительно выполняется калибровка на настроечном образце для каждого из лучей электронного сканирования в соответствии с ASTM E2373 [3].

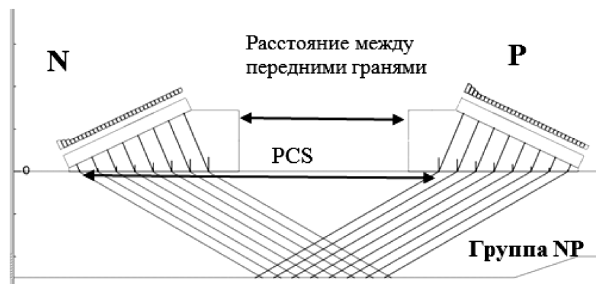


Рис. 3. Измерение донной поверхности методом TOFD

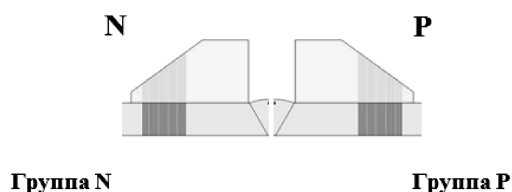


Рис. 4. Измерение толщины в околошовной зоне

Измерение толщины в околошовной зоне выполняется с применением двух АР, расположенных с обеих сторон сварного соединения, работающих в режиме электронного сканирования углом ввода 0° , по времени прихода донного сигнала (рис. 4).

С применением моделирования процесса УЗК программой CIVА и при измерениях на испытательных образцах, содержащих модели утонений были разработаны расчетно-технические обоснования, были показавшие, что использование методик позволяет:

- получить изображение дна в основном металле трубопроводов с шириной зоны сканирования не менее 15 мм (с использованием одной АР), не менее 40 мм (с использованием двух АР по схеме TOFD) и не менее 65 мм (с использованием двух АР по схеме TOFD и схеме измерения толщины в околошовной зоне);
- изменять толщину стенки трубопроводов диаметром от 159 до 426 мм в диапазоне от 2 до 60 мм;
- погрешность измерения толщины с использованием одной АР $\pm 0,2$ мм и с использованием двух АР в режиме TOFD до $\pm 2,5$ мм;
- подход на базе TOFD в силу специфики метода обеспечивает достоверное измерение минимального значения толщины под валиком усиления, но обладает низкой разрешающей способностью по координате вдоль оси трубопровода.

Для последующего развития УЗСТ можно выделить следующие пути развития:

- разработка методологии метрологической поверки технических средств УЗСТ;
- разработка 2D сканера типа «мышь» для проведения УЗСТ основного металла в произвольных местах трубопроводов;
- увеличение диапазона контролируемых диаметров и толщин;
- совмещение TOFD-толщинометрии с проведением ультразвукового контроля методом TOFD;
- внедрение метода цифровой фокусировки антенны (ЦФА) для измерения профиля донной поверхности, в том числе конусных проточек [4];
- разработка технических средств автоматизированной УЗСТ;
- разработка единой методики автоматизированной УЗСТ с использованием средств электронного и механического сканирования.

Литература

1. <http://www.atomdb.jnes.go.jp/content/000025568.pdf>
2. ПНАЭГ-7-031–91. Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов. Ультразвуковой контроль. Ч. III: Измерение толщины монометаллов, биметаллов и антикоррозионных покрытий.
3. ASTM E 2373. Standard Practice for Use of the Ultrasonic Time of Flight Diffraction (TOFD) Technique.
4. Базулин Е.Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки // Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 51 – 75.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОМЕТРИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Базулин Е.Г.

НПЦ «ЭХО+», Москва, Россия

При проведении ультразвукового неразрушающего контроля антенные решетки применяются не только в режиме фокусирующей антенной решетки, но и в режиме цифровой фокусировки (ЦФА), когда изображения несплошностей восстанавливаются методом C-SAFT по эхосигналам, измеренным в режиме двойного сканирования. Такой подход предоставляет больше возможностей для применения различных алгоритмов получения высококачественного изображения. К числу простейших алгоритмов можно отнести когерентное сложение парциальных ЦФА-изображений при регистрации эхосигналов в разных положениях антенной решетки, так называемый режим тройного сканирования. Такая обработка при достаточной области сканирования позволяет восстановить изображения несплошностей с постоянным и равным примерно длине волны фронтальным разрешением во всем объеме толстостенных изделий с повышенным отношением сигнал/шум. Метод ЦФА позволяет по один раз измеренным эхосигналам восстанавливать парциальные изображения отражателей по многим акустическим схемам с учетом конверсии типов волн при отражении от неровных границ объекта контроля. Множество парциальных изображений можно объединить в одно высококачественное изображение, по которому с высокой точностью можно определять тип и размеры несплошности. Дополнительно повысить качество изображения можно, уменьшив длительность эхосигналов за счет построения AR-модели их спектров [1].

На рисунке 1 слева показано изображение границы отверстия бокового сверления диаметром 2 мм просверленного на глубине 6 мм от поверх-

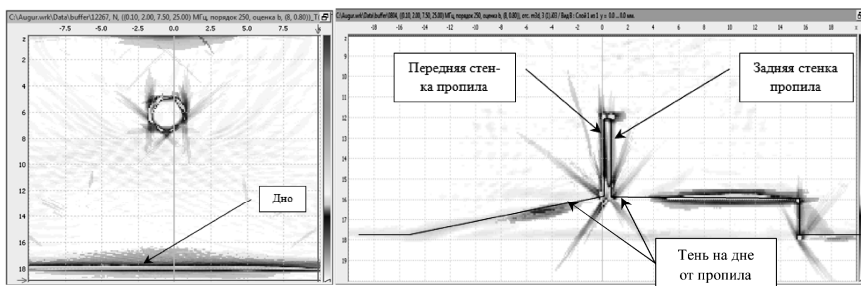


Рис. 1. Изображения отверстия бокового сверления диаметром 2 мм (слева) и пропила шириной 0,5 мм в образце с неровным дном (справа)

ности в образце толщиной 18 мм, а справа приведено изображение пропила шириной 0,5 мм и высотой 4 мм в образце толщиной 18 мм с неровным дном. Контурсы образца на рис. 1 справа показаны линиями черного цвета. Для регистрации эхосигналов использовалась 32-х элементная антенная решетка с шагом между элементами 1 мм с рабочей частотой 5 МГц, установленная на призму с углом наклона 35°. Спектры эхосигналов за счет построения AR-модели их спектров были расширены с интервала [2,0; 7,5] на интервал [0,1; 20,0] МГц. По полученным изображениям можно определить тип отражателя, так как восстановлена вся его граница, а его размеры можно измерить с точностью до четверти длины волны.

Более сложные методы обработки эхосигналов могут быть основаны на сведении обратной задачи рассеивания к системе линейных алгебраических уравнений. В этом случае для ее устойчивого решения можно применять методы регуляризации, когда в качестве регуляризирующих функционалов можно использовать норму изображения, энтропию изображения и прочие. Использование энтропии изображения позволяет восстанавливать изображения несплошностей со сверхразрешением и с высоким отношением сигнал/шум с учетом заданных акустических схем, определяемых количеством отражения импульса от границ объекта контроля [2]. Нелинейный характер алгоритма позволяет использовать около 10 % измеренных эхосигналов, что уменьшает объем хранимых и передаваемых по каналам связи эхосигналов. В модельном эксперименте эхосигналы от вершин шести моделей трещин высотой 15 мм и раскрывом 0,05 мм с углом наклона 60° в блоке из дюралюминия регистрировались сканирующим наклонным одноэлементным преобразователем, работающим на продольной волне, с шириной диаграммы направленности около 40° и рабочей частотой 2,5 МГц.

На рисунке 2 слева представлено изображение вершин шести наклонных пропилов, восстановленное корреляционным методом, а справа – ММЭ. Изображение, полученное ММЭ, в сравнении с изображением, полученным корреляционным способом, имеет продольное разрешение при-

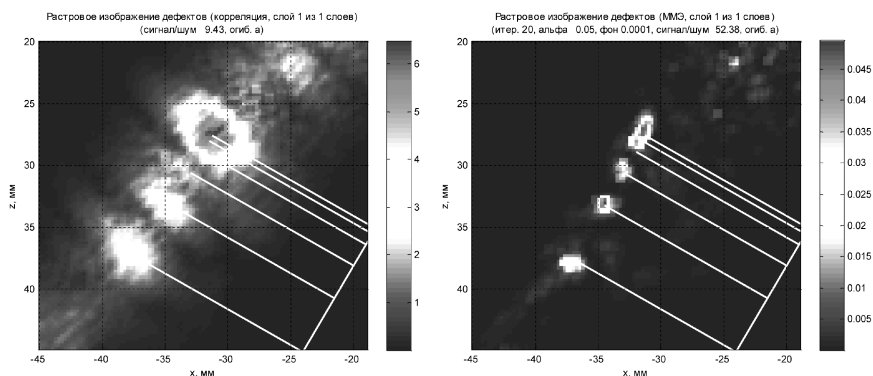


Рис. 2. Изображения вершин шести наклонных пропилов, восстановленные корреляционным методом (слева) и ММЭ (справа)

мерно в пять раз выше. Фронтальное разрешение улучшилось примерно в три раза, а отношение сигнал/шум возросло практически на 20 дБ. Линиями белого цвета на рисунки наброшена маска образца и шести наклонных пропилов.

Разработанные алгоритмы позволяют получать высококачественные изображения всей границы несплошности с высокой разрешающей способностью и малым уровнем шума, которые могут использоваться для решения задач дефектометрии.

Литература

1. **Марпл-мл. С.Л.** Цифровой спектральный анализ / пер. с англ. М.: Мир, 1990. 584 с.
2. **Базулин Е.Г.** О возможности использования в ультразвуковом неразрушающем контроле метода максимальной энтропии для повышения разрешающей способности изображения по эхосигналам // Акустический журнал. 2013. Т. 59, № 2. С. 235 – 254.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИБОРОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ И ФАЗИРОВАННЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ

Базулин Е.Г.
НПЦ «ЭХО+», Москва, Россия

В настоящее время для проведения неразрушающего ультразвукового контроля применяются системы формирующие изображения несплошностей, как по технологии фазированных антенных решеток (ФАР), так и ис-

пользующие метод C-SAFT для восстановления изображений по эхосигналам, измеренным в режиме двойного сканирования [1]. Второй режим называется цифровой фокусировкой антенной решеткой (ЦФА).

На рисунке 2 представлены изображения четырех верхних отверстий теста фронтального разрешения (рис. 1): слева – полученные в режиме ФАР-дефектоскопа при выборе закона фокусировки на глубину 30 мм (слева), справа – в режиме ЦФА-дефектоскопа. Расчеты проводилась для **поперечной волны**. Эхосигналы регистрировались 32-х элементной решеткой с шагом между элементами 1 мм, установленной на рексолитовую призму с углом наклона 36° . Фронтальное разрешение ЦФА-изображения улучшилось более чем в три раза в сравнении с ФАР-изображением. Блик самого близкого к поверхности отверстия на ЦФА-изображении имеет правильные координаты, в то время как на ФАР-изображении блик этого отверстия сместился в глубину на 1 мм. Для уменьшения влияния этих эффектов в ФАР-дефектоскопах предусмотрен режим динамической фокусировки по глубине [2]. Амплитуда бликов ЦФА-изображения, возникших из-за перерасеивания на отверстиях, более чем на два раза меньше, чем на изображении, полученном в режиме ФАР-дефектоскопа.

Парциальные изображения, восстановленные ЦФА-дефектоскопом при разных положениях антенной решетки можно когерентно складывать для получения постоянного и равного примерно длине волны разрешения во всем объеме толстостенного изделия [3]. На рисунке 3 представлены изображения, восстановленные **на продольной волне** по эхосигналам, которые использовались для восстановления изображения на рис. 2. На левой панели показано одно из парциальных изображений, а на правой их когерентная сумма. Фронтальное разрешение парциального изображения не

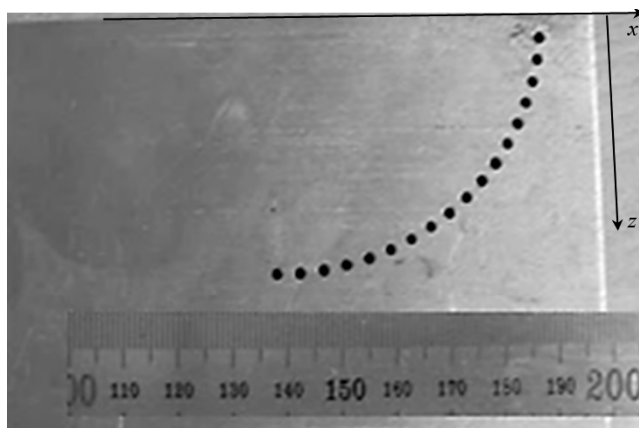


Рис. 1. Тест фронтального разрешения из 18 отверстий бокового сверления диаметром 2,0 мм

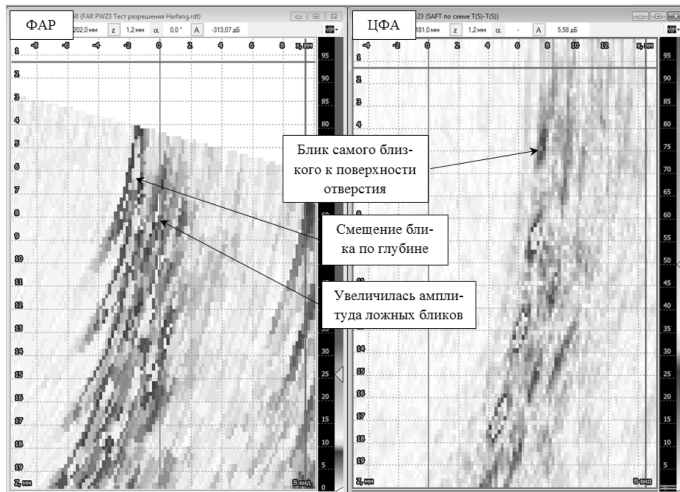


Рис. 2. Увеличенный фрагмент изображения теста фронтального разрешения

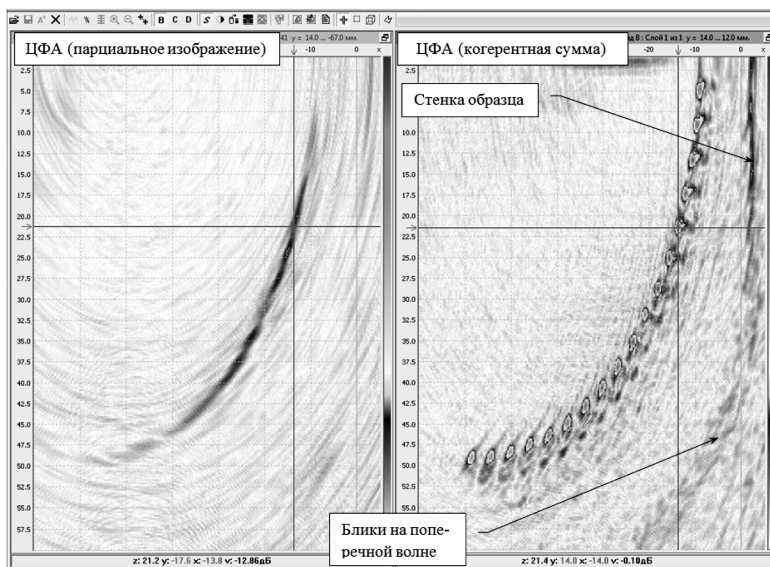


Рис. 3. Изображения теста фронтального разрешения на продольной волне

позволяет различить ни одного отверстия, в то время как на суммарном изображении, имеющем фронтальное разрешение примерно 2 мм, все 18 отверстий отчетливо разрешаются.

Возможность восстанавливать по один раз измеренным эхосигналам парциальные изображения отражателей методом ЦФА для многих акустических схем с последующим их объединением в одно высококачественное изображение, должна позволить надежно автоматизировать процесс распознавания и образмеривания отражателей. Еще одно достоинство изображений, полученных ЦФА-дефектоскопом с трехмерной фокусировкой, это возможность восстанавливать изображения в единой системе координат при использовании антенных решеток на призмах разной конфигурации. Единая область восстановления изображения (ОВИ) облегчает совместный анализ результатов контроля. Частоты формирования изображений по технологии ФАР и ЦФА сопоставимы и составляют величину более 20 Гц. Так как ЦФА-дефектоскопы работают с наборами эхосигналов, то для них требуются более скоростные каналы передачи информации, в отличие от ФАР-дефектоскопов. Кроме того, ФАР-дефектоскопы имеют неоспоримое преимущество перед ЦФА-дефектоскопами, если методика контроля основана на использовании нелинейных эффектов.

Таким образом, можно сделать вывод, что для автоматизированных систем неразрушающего контроля целесообразнее использовать ЦФА-дефектоскопы, по следующим причинам: ЦФА-изображения имеют более высокое фронтальное разрешение на всей ОВИ; ЦФА-изображения для повышения фронтального разрешения можно когерентно складывать; ЦФА-изображения, полученные антенными решетками на призмах разной конфигурации и ориентации можно восстанавливать в единой ОВИ, что облегчает их совместный анализ; метод ЦФА легко модифицируется для трехмерной обработки эхосигналов; ЦФА-изображения восстановленные по нескольким акустическим схемам по единожды измеренным эхосигналам можно объединять в одно высококачественное изображение, анализ которого должен позволить надежно автоматизировать процесс распознавания и образмеривания отражателей.

Литература

1. Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29 – 41.
2. **Advances** in Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Publisher: Waltham, MA: Olympus NDT, 2007. <http://www.olympus-ims.com/en/books/>
3. Базулин Е.Г. Определение типа дефекта по изображениям, полученным методом C-SAFT с учетом трансформации типов волн при отражении ультразвуковых импульсов от неровных границ объекта контроля // Дефектоскопия. 2011. № 1. С. 39 – 56.

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ОЦЕНКИ МАЛОРАЗМЕРНЫХ НЕСПЛОШНОСТЕЙ МЕТАЛЛА ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЭХО-ТОМОГРАФИИ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ ФОКУСИРОВКИ АПЕРТУРЫ

Бишко А.В., Самокрутов А.А., Соколов Н.Ю., Шевалдыкин В.Г.
ООО «Акустические Контрольные Системы», Москва, Россия

Оценка и браковка несплошностей металлоконструкций, в частности, сварных соединений при контроле их с помощью ультразвуковых (УЗ) визуализирующих дефектоскопов непосредственно по реконструированному изображению используется пока достаточно редко. Особенно при малых волновых размерах несплошностей.

При контроле изделий дефектоскопом, основанным на методе цифровой фокусировки апертуры (ЦФА) антенной решетки (АР) малоразмерные несплошности оценивают по двумерной АРД-диаграмме. Амплитуда образа несплошности автоматически пересчитывается в эквивалентную площадь дискового отражателя.

Вместо амплитуды образа, в качестве информативного параметра для оценки площади предложено использовать интегрирование яркости образа по некоторой площади изображения в окрестности пикового значения. Это позволило уменьшить погрешность оценки размера несплошности.

Для повышения достоверности оценок несплошностей при контроле реальных изделий используется автоматическая адаптация прибора к качеству акустического контакта, построенная на анализе усредненного уровня принимаемых импульсов головных УЗ волн.

Оценка выполняется с учетом известного или предварительно измеренного коэффициента затухания поперечных волн в материале объекта контроля.

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ РАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ МЕЖРЕМОНТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Бобренко В.М., Бобров В.Т., Гульшин А.В.

В различных отраслях промышленности используется большое количество разъемных соединений, сроки службы которых достигают 10 и более лет, а сроки проведения межрегламентных работ относительно большие, что требует проведения мониторинга оборудования для определения его фактического состояния. Как известно, наиболее эффективной является

ультразвуковая (УЗ) тензометрия разъемных соединений, основанная на явлении акустоупругости, заключающемся в зависимости скорости распространения УЗ волн от механических напряжений в упругом теле.

Однако реализованная на практике и положенная в основу ГОСТ Р 52889–2007 методика контроля затяжки разъемных соединений с применением продольных УЗ волн пригодна только в процессе сборки объектов, например, в аэрокосмической отрасли и при эксплуатации энергоблоков АЭС, ГЭС, ТЭС, где проводятся регулярные ежегодные регламентные профилактические ремонты.

В связи с этим был выполнен анализ способа контроля напряжений с использованием как продольных, так и сдвиговых УЗ волн. В общем виде зависимость для продольной или сдвиговой УЗ волн в нашем случае выглядит следующим образом:

$$\rho v_{ik}^2 = \rho_0 v_0^2 (1 - \beta_{ik} \sigma). \quad (1)$$

Разница по абсолютной величине акустоупругих коэффициентов скорости распространения продольных и сдвиговых УЗ волн β_{ik} и равнозначное влияние деформации детали при нагружении (изменение акустического пути по закону Гука) на результаты акустических измерений привели к выводу о целесообразности использования при контроле одновременно обоих типов УЗ колебаний [1]. Это подтверждается, например, экспериментальной работой [2].

Для практики контроля механических напряжений растяжения уравнение (1) с точностью до 0,01 % можно линеаризовать, принимая, что $\rho_0 = \rho$ (плотность не изменяется при деформировании).

В докладе представлены параметры ЭМА преобразователя для одновременного или поочередного возбуждения и приема продольных и сдвиговых УЗ-волн (пат. РФ на изобретение № 2334981), реализации эхосигналов продольной и сдвиговой волн в болтах и шпильках с различной толщиной при их одновременном возбуждении. Отмечается, что при использовании способа акустоупругого контроля одноосно-напряженного состояния, не требующего предварительного измерения времени распространения УЗК в ненагруженном болте, для оценки осевой нагрузки используют отношение времени распространения импульсов сдвиговых и продольных волн τ_s / τ_l .

Для метрологического обеспечения метода и аппаратуры может быть использован комплект стандартных образцов КМВР1-0, аттестованных по времени распространения ультразвука. Результаты исследований показывают, что реализация метода требует проведения прецизионных измерений с абсолютной погрешностью $\leq 0,001$ мкс, что вполне обеспечивается современными методами и технологией ЭМА возбуждения УЗ волн.

Литература

1. **Bobrenko V.M., Kutsenko A.N., Rudakov A.S.** The Acoustoelasticity and Problems of the Acoustic Strain Gauging in the Non-destructive Testing, X. Int. Conf. NDT. Moscow, 1982. V. 2. P. 171 – 178.
2. **Hajime Yasui, Koichiro Kawashima.** Acoustoelastic Measurement of Bolt Axial Load with Velocity Ratio Method, 15th World Conference on NDT. Rome (Italy), 2000. <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn083/idn083.htm>

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ЛИНЕЙНОГО НАКЛОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ФАЗИРОВАННОЙ РЕШЕТКОЙ

Воронков И.В.

(ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»), Москва, Россия

Практическое применение преобразователей с фазированными решетками (ФР) в ультразвуковом контроле обуславливается пониманием физических принципов работы таких преобразователей, в том числе, особенностей формирования их диаграмм направленности. Целью данной работы является компьютерное моделирование диаграмм направленности линейного наклонного преобразователя с фазированной решеткой в зависимости от числа излучающих элементов, размеров решетки, угла ввода, а также сравнение результатов теории и эксперимента для установления соответствия описания разработанной моделью такого преобразователя реальной физической характеристики.

Диаграмма направленности наклонного преобразователя с фазированной решеткой, нормированного на максимальное значение при угле ввода $\alpha = \alpha_0$ описывается соотношением

$$\Phi_{\text{ФР}}^{Nm}(h, \alpha) = \frac{[A_{\Sigma m}(h, \alpha)]_{\text{max}}}{[A_{\Sigma m}(h, \alpha_0)]_{\text{max}}},$$

где $[A_{\Sigma m}(h, \alpha)]_{\text{max}}$ – максимум огибающей суммарного сигнала для дальности h от точки ввода центрального луча и текущего угла ввода α при фокусировке для угла ввода $\alpha = \alpha_0$.

В ходе расчетов было установлено, что диаграмма наклонного преобразователя с ФР при фокусировке подобна импульсной диаграмме направленности линейного излучателя длиной около 0,8 длины решетки. При этом в отсутствие фокусировки интерференция импульсов преобразователя с отдельными элементами в точке регистрации носит такой же характер, как и интерференция импульсов элементарных излучателей, образующих протяженный излучающий элемент.

Сравнение теоретических и экспериментальных диаграмм направленности наклонного преобразователя с ФР проводилось на основе экспериментальных результатов, полученных А.Н. Разыграевым и И.А. Диковым на образце СО-2 с глубинами фокусировки $h = 15$ мм и $h = 40$ мм и номинального угла ввода при используемой призме $\alpha_0 = 45^\circ$. Сравнение показало вполне удовлетворительное совпадение теоретических и экспериментальных результатов с учетом того, что собственно процесс отражения сигналов элементов решетки от цилиндрического образца в полной мере не рассматривался, однако, было учтено влияние взаимной трансформации продольных и поперечных волн как при излучении, так и при приеме сигнала. Тем не менее, несмотря на некоторое отличие компьютерной и физической моделей, сравнение теоретических и экспериментальных результатов показывает, что использовавшаяся расчетная модель позволяет вполне адекватно, в целом, моделировать диаграмму направленности наклонного преобразователя с линейной фазированной решеткой.

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ БАЗИСНЫХ МЕТОДОВ СТРУКТУРНОГО МОНИТОРИНГА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОБЪЕКТОВ

Жуков С.Н.

APC International Ltd., Макейвилл, Пенсильвания, США

Большинство современных методов неразрушающего контроля осуществляется либо в ходе производства узлов и изделий, либо в ходе эксплуатации объекта, но при этом его работа должна быть приостановлена, что не всегда возможно и на что необходимы дополнительные затраты времени, рабочей силы и финансирования.

Структурный мониторинг работоспособности (СМР) объектов является инновационным разделом неразрушающей оценки качества, основанным на использовании структурного отклика объекта в ходе его функционирования (эксплуатации), с целью определения уровня его работоспособности. СМР является ключевым компонентом систем прогнозирования дефектов, осуществляется в режиме реального времени, как правило, применительно ко всему технически сложному объекту в ходе его функционирования. В ходе СМР может осуществляться контроль жесткости и целостности конструкции, выявление снижения вязкости смол, непосредственное определение уровня дефекта (ослабления соединений, величины деламации, размеров трещин, раковин, коррозии и т.п.).

Во встроенных (бортовых) системах структурного мониторинга работоспособности могут быть использованы такие методы контроля и диагностики, как: спектрометрия на основе оптоволоконных сенсоров, инфра-

красная термография, звуковая эмиссия (волновая акустическая), ультразвуковой, микроволновый и диэлектрический методы.

В основу структурного мониторинга работоспособности технически сложных объектов и конструкций положены, так называемые, базисные (сравнительные) методы. Базисные методы СМР основаны на сравнении текущих сигналов отклика объекта в ходе эксплуатации с базисными сигналами отклика, измеренными заранее на введенном в эксплуатацию объекте при условии полной его работоспособности.

В иерархии базисных методов СМР на первом месте идут вибрационные методы. Вторую ступень занимает волновой метод, использующий волны Лэмба для обнаружения трещин. Далее идут ультразвуковое исследование (импедансный метод) и акустическая эмиссия. Первые три являются активными методами СМР, последний – пассивным.

Все эти четыре метода отличаются следующим:

- каждый из них оперирует в различных частотных диапазонах, в связи с чем, распознаются различные типы и уровни повреждений;
- каждый требует своей схемотехники и своего уровня потребляемой энергии.

В то же время, каждый метод может использовать в качестве чувствительных элементов ЦТС пьезокерамику, пьезоэлектрические релаксоры, 1–3 волоконные или макро-волоконные пьезокомпози́ты.

В настоящее время проводятся исследования по отработке перспективных ультразвуковых методов с целью обеспечения диагностики алюминия, современных композитных и неметаллических материалов. К таким методам относятся: ультразвуковая лазерная диагностика, ультразвуковая диагностика в воздушной согласующей среде и акусто-ультразвуковое тестирование (метод «управляемых волн»).

Компонентами структурного мониторинга работоспособности являются:

- актюаторы (обычно пьезоэлектрические), предназначенные для возбуждения колебаний в конструкции,
- датчики для получения обратного отклика;
- алгоритм для обработки сигнала отклика с целью выявления и измерения определенного рода дефекта или его признака;
- компьютер (микроконтроллер) для управления процессом мониторинга и обеспечения его алгоритма;
- телеметрия – компонент передачи данных о состоянии узлов, конструкций и всего объекта;
- источник электроэнергии (батарея, бортовая сеть либо система утилизации паразитной энергии).

Бурное развитие интегральной схемотехники привело к созданию принципиально новых измерительных преобразователей – интеллектуальных датчиков (ИД). Их использование дает возможность по-новому подой-

ти к распределению функций между основными элементами систем контроля и управления, в частности освободить центральный процессор от необходимости обработки больших объемов первичной информации.

Базой интеллектуальных датчиков для системного мониторинга работоспособности объектов являются чувствительные и исполнительные элементы на основе «умных» материалов, к которым относят современные и перспективные пьезоэлектрические материалы, такие как: пьезокерамика, пьезопленки, пьезокомпозиты, пьезоэлектрические монокристаллы, пьезорелаксоры, фотострикторы, нанопьезокерамика, многофункциональные наноматериалы.

Компания APC International Ltd. (Пенсильвания, США) производит и поставляет для целей неразрушающего контроля и технической диагностики высококачественные ЦТС пьезокерамические материалы, а также пьезоэлементы изготовленные из ЦТС пьезокерамики, релаксорного ферроэлектрического монокристалла PMN-PT и 1-3 пьезокомпозитов ЦТС (стандартных и волоконных).

Кроме указанных материалов и пьезоэлементов компания поставляет более 350 типоразмеров пакетных дискретных и монокристаллических актюаторов, а также макро-волоконные композитные пьезоактюаторы. Макро-волоконные композиты обладают высокими рабочими характеристиками, эластичностью, надежностью и являются основой для изготовления плоских актюаторов и датчиков, применяемых в структурном мониторинге работоспособности.

Большое внимание уделяется разработке и изучению свойств нанопьезокерамики, которая позволяет создавать по спецификации заказчика композитные многослойные элементы и актюаторы для специального применения (состоящие из блоков различных материалов).

Применение современных качественных и перспективных пьезоматериалов в сочетании с использованием инновационных технологий МЭМС и НЭМС позволяет обеспечивать высокий уровень качества и надежности неразрушающего контроля, диагностики и структурного мониторинга работоспособности технически сложных объектов.

ОСОБЕННОСТИ ВОЛНОВОДНОГО ЭХО-МЕТОДА ПРИ ВНУТРИТРУБНОМ КОНТРОЛЕ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ТРУБОПРОВОДОВ

Заец М.В., Самокрутов А.А., Алехин С.Г., Подольский А.В.
ООО «Акустические Контрольные Системы»

В работе описаны результаты теоретических и экспериментальных исследований по возможностям ультразвукового волноводного эхо-импульсного метода для обнаружения коррозионных и стресс-коррозионных дефектов в

теле основного металла трубы в условиях доступа к ее внутренней поверхности. Особенности такого контроля являются наличие изоляции и нахождение трубы в грунте. Данные факторы приводят к появлению дополнительных помеховых сигналов. Для работы в таких условиях требуется высокая чувствительность системы, добиться которой можно используя антенные решетки и волноводный метод прозвучивания.

В работе показана целесообразность использования низкочастотного ультразвукового диапазона 50...100 кГц, что реализуется технологией с использованием преобразователей с сухим точечным контактом.

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЗОНДИРОВАНИИ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБ

Иншаков Д.В., Быков С.П., Кузнецов К.А.

ОАО «ИркутскНИИХиммаш», Иркутск

Выполнены экспериментальные исследования особенностей распространения акустического импульса при зондировании труб методом акустической импульсной рефлектометрии. Это сравнительно новый метод скрининг-контроля труб малого диаметра, прежде всего теплообменников. Суть метода акустической импульсной рефлектометрии (АИР) заключается в возбуждении короткого акустического импульса в виде скачка воздушного давления на входе трубы с последующим прослеживанием его распространения внутри трубы и анализом отражений, возникающих на неоднородностях сечения просвета трубы. По отраженному сигналу оценивают характер неоднородности, ее местоположение в трубе и затухание сигнала в акустическом тракте.

Характер отражения сигнала сложным образом зависит от параметров отражателя, от свойств среды, состояния стенки трубы, а также от характеристик зондирующего сигнала.

Исследованы параметры затухания сигнала, изменения формы и спектра сигнала, характеристики отражения при многократных обходах трубы.

В экспериментах использовался прибор АИР, разработанный ОАО «ИркутскНИИХиммаш». Акустический зондирующий импульс производился подачей на электродинамический излучатель однополярного прямоугольного импульса длительностью 90 мкс регулируемой амплитуды. Отраженный сигнал принимался микрофоном, преобразовывался в цифровой вид и анализировался программно-аппаратными средствами. В качестве объекта контроля использовались стальные трубы Ду 35 мм длиной 2,7 м и Ду 21 длиной 4 м. Трубы в эксплуатации не находились, и специальной обработки внутренней поверхности не производилось.

После генерации зондирующего импульса микрофон регистрировал затухающие по амплитуде импульсы отражений от дальнего открытого конца трубы после каждого обхода трубы до полного затухания.

Измерения показывают, что форма импульсов и длительность существенно меняются с увеличением пути распространения. Спектры импульсов также испытывают изменения. Как показано на рис. 1, в первую очередь затухают высокочастотные составляющие спектра.

На рисунке 2 показаны дифференциальные спектры вышеописанных сигналов. Кривая 1 дает относительные изменения в спектре сигнала после второго обхода трубы с однократным отражением от ее открытого конца. Вторая и третья кривые, соответственно, показывают изменения в спектре в ходе третьего и четвертого обходов.

Принимая во внимание снижение точности вычислений при уменьшении интенсивности, можно заключить, что при каждом обходе трубы в спектре сигнала происходят подобные изменения. Высокочастотные составляющие испытывают более существенное ослабление. Так, если после трехкратного обхода амплитуда сигнала на частоте 1000 Гц уменьшится до $(1 - 0,4)^3 = 0,21$, т.е. в 5 раз, то составляющая сигнала с частотой 4500 Гц ослабится до $(1 - 0,8)^3 = 0,008$, или в 125 раз.

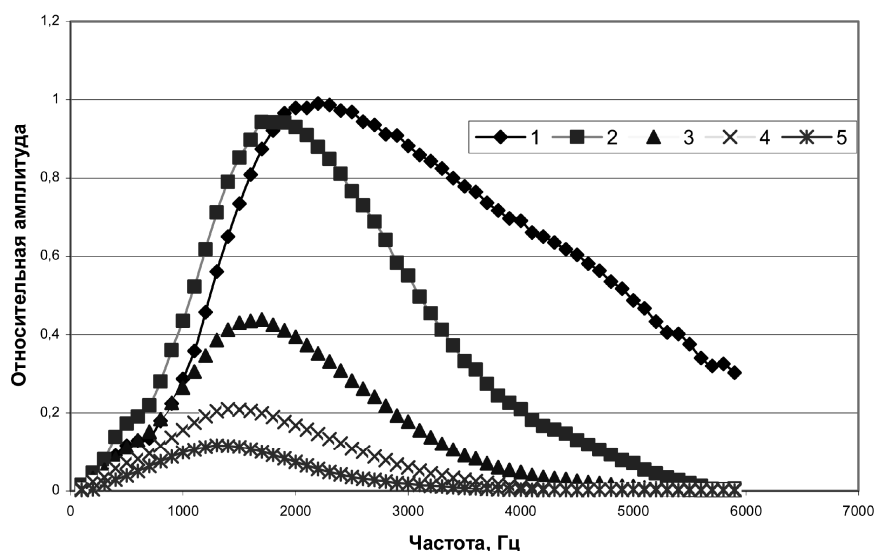


Рис. 1. Спектры акустических импульсов возбуждения (кривая 1) и последующих обходов трубы:
первого – кривая 2; второго – 3; третьего – 4; четвертого – 5

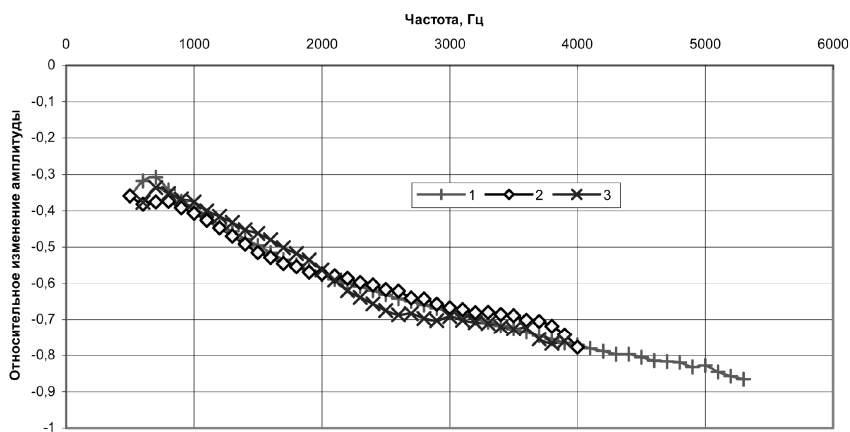


Рис. 2. Нормированные дифференциальные спектры сигналов повторных обходов:

1 – второго и первого; 2 – третьего и второго; 3 – четвертого и третьего

Для измерений интегрального ослабления акустического сигнала при распространении в трубе без препятствий, а также потерь на отражение от конца трубы был предложен метод с применением двух микрофонов на эквидистантных участках акустического тракта. Такой метод позволил избежать калибровки разной чувствительности микрофонов.

Для указанных параметров зондирующего импульса были получены следующие результаты. Показатель ослабления акустического сигнала с расстоянием составил 0,08 Нп/м или 0,7 дБ/м. Коэффициент отражения от заглушенного конца трубы при полной герметизации и хорошем качестве внутренней поверхности заглушки достигает 0,98. Коэффициент отражения амплитуды сигнала при отражении от открытого конца для обеих труб составил величину 0,83. Коэффициенты отражения от конца трубы, где установлен зондирующий датчик, для труб со своими датчиками в наших измерениях составили 0,45 и 0,8. Такое различие связано с разной формой амбушюра и не имеет принципиального значения.

Измеренное значение затухания акустического сигнала существенно превышает затухание, связанное с поглощением звука в воздухе, которое для частоты 2 кГц должно быть порядка $5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ [1]. Очевидно затухание акустического сигнала в трубе, главным образом, связано с поглощением энергии на стенках трубы.

Приведенные результаты позволяют целенаправленно подойти к оптимизации зондирующего сигнала, а также к выбору критериев количественной оценки параметров неоднородностей сечения трубы, приводящие к отражению акустического сигнала.

В докладе приводятся обширные результаты зондирования труб теплообменных аппаратов, в том числе приводятся сложные случаи, мешающие интерпретации результата контроля и его количественной оценке.

Литература

1. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: Изд-во иностр. лит., 1956. 728 с.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ КООРДИНАТ ДЕФЕКТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК В УЗ ДЕФЕКТОСКОПАХ

Козлов В.Н., Козлов А.В.

ООО «Акустические контрольные системы»

Точность измерений при ультразвуковом неразрушающем контроле имеет решающее значение при определении местоположения дефектов.

При использовании одиночного преобразователя совместно с УЗ дефектоскопом погрешность найденных координат дефекта в сильной степени зависит от формы акустического пучка, излучаемого преобразователем. В то же время, хорошо известно, что пространственные размеры пучка в наибольшей степени зависят от волновой апертуры ПЭП. В результате фактическое разрешение при подобного рода измерениях оказывается гораздо хуже рэлеевского предела (равного длине волны основной компоненты спектра излучения ПЭП).

Расхождение луча как в ближней (френелевская дифракция), так и в дальней зоне (фраунгоферовская дифракция) отрицательно сказываются на фронтальной разрешающей способности при ультразвуковом контроле. Этот параметр определяется шириной ультразвукового пучка Φ по уровню – 6 дБ от максимальной амплитуды на выбранном фазовом фронте, и его можно оценить по формуле

$$\Delta d = \Phi/4.$$

Поскольку при увеличении глубины УЗ пучок расширяется вследствие дифракции, то и указанное фронтальное разрешение ухудшается с глубиной. Ухудшение разрешения приводит к увеличению погрешности определения положения дефектов. Кроме того, и в ближней зоне наличие мертвой зоны и дифракционных колебаний амплитуды также нежелательно сказываются на диапазоне и точности измерений.

В значительной степени ситуацию можно улучшить использованием вместо одиночных преобразователей антенных решеток. Дело в том, что антенные решетки позволяют осуществлять управляемую фокусировку акустического пучка. За счет расширения и управляемости апертуры диа-

грамма направленности такой решетки может быть сделана гораздо более узкой, и сфокусированный пучок будет иметь меньший поперечный размер фокальной области по сравнению с естественным фокусомодиночного преобразователя.

Поперечное разрешение вдоль оси, параллельной апертуреизлучателя, дается приближенной формулой [1]

$$\Delta d = \frac{0,11c}{f \sin(\theta/2)},$$

где c – скорость ультразвука; f – рабочая частота; θ – угол, под которым видна апертура из фокальной точки.

Необходимо отметить, что продольная разрешающая способность в большей степени зависит от длительности зондирующего импульса дефектоскопа [2], поэтому при использовании решетки преобразователей вместо одиночного преобразователя точность определения положения дефектов вдоль акустической оси преобразователя практически не изменяется.

В качестве примера рассмотрим два различных дефектоскопа производства ООО «АКС» A1212Master и A1550Introvisor. Первый может использоваться со стандартными одиночными пьезоэлектрическими преобразователями, а вместе со вторым применяются, помимо стандартных ПЭП, антенные решетки двух типов: 16 элементные антенные решетки продольных и поперечных волн с центральной рабочей частотой 4 МГц. Для антенной решетки продольных волн M9060 эффективная рабочая апертура составляет 40 мм, что примерно в три раза больше апертуры одиночного пьезоэлектрического преобразователя. Например, размер рабочей поверхности раздельно-совмещенного преобразователя D1771, рассчитанного также на 4 МГц и используемого вместе с дефектоскопа A1212, составляет 12 мм. Увеличение эффективной акустической апертуры приводит в свою очередь и к увеличению разрешения вдоль волнового фронта, позволяя добиться более высокой точности измерения положения дефектов. Кроме того, акустические решетки обеспечивают возможность сканирования объекта контроля в некотором диапазоне углов (для упомянутой решетки примерно $\pm 30^\circ$) за счет применения электронно управляемой фокусировки.

Таким образом, применение акустических решеток позволяет автоматизировать процесс сканирования объекта контроля и успешно решать томографические задачи, получая изображения несплошностей внутри данного объекта с высоким разрешением.

Литература

1. **Advances** in Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Advanced Practical NDT Series. Olympus NDT, 2007.
2. **Ермолов И.Н., Ермолов М.И.** Ультразвуковой контроль. Изд. 5-е. М.: Изд. дом «Азимут», 2006.

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕСАХ И РЕЛЬСАХ МЕТОДОМ АКУСТОУПРУГОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Муравьев В.В., Волкова Л.В., Балобанов Е.Н., Котоломов А.Ю.
*Ижевский государственный технический
университет им. М.Т. Калашникова, г. Ижевск, Россия*

Стандарты и руководящие документы РД 32.144–2000, СТО 1.11.02–2008, EN 13262–2004 рекомендуют ультразвуковой метод измерения остаточных напряжений в ободьях цельнокатаных колес. При этом уровень сжимающих напряжений в окружном направлении на расстоянии 10 мм от поверхности катания не должен превышать 190 МПа с переходом в растягивающие на глубине не менее 40 мм от поверхности катания. Эти условия выполняются с помощью измерений времени задержки поперечных взаимноперпендикулярно поляризованных волн, распространяющихся нормально к поверхности ввода, что обеспечивается с помощью электромагнитно-акустического (ЭМА) способа возбуждения-приема упругих волн.

В ободьях железнодорожных вагонных колес, вследствие механических и физико-химических процессов при изготовлении, формируются остаточные напряжения: вблизи поверхности катания – сжимающие напряжения, уровень которых снижается и переходит в растягивающие по мере приближения к диску колеса. В бандажах для посадки на центры локомотивных колес имеет место иное распределение напряжений. Однако, после горячей посадки бандажа с натягом на колесный центр происходит перераспределение внутренних напряжений.

В ходе исследований был использован ультразвуковой поляризационно-временной метод измерения напряжений, основанный на измерении разности времен распространения двух сдвиговых волн с взаимноперпендикулярными плоскостями поляризации, совпадающими с главными напряжениями в анизотропном материале. Разработанная экспериментальная установка, основанная на бесконтактном способе возбуждения и приема поперечных волн с помощью ЭМА преобразователя, обеспечивает инструментальную погрешность измерений времени задержки, не превышающую 0,01 %. Специально разработанная магнитная система ЭМА преобразователя обеспечивает значение нормальной составляющей вектора магнитной индукции в среднеуглеродистой стали до 2,7 Тл при воздушном зазоре 0,5 мм между полюсом магнита и поверхностью ввода. Специализированное программное обеспечение позволяет одновременно наблюдать на мониторе эхограммы многократных переотражений двух поперечных волн и с необходимой точностью определять разность времен прихода.

$$\sigma = D(a - a_0) = Da - Da_0; \quad (1)$$

$$a = \frac{t_2 - t_1}{t_2}; \quad (2)$$

$$a_0 = \frac{t_{02} - t_{01}}{t_{02}}, \quad (3)$$

где D – акустоупругий коэффициент для данной марки стали [МПа]; a – фактор акустической анизотропии материала, обусловленный вкладом напряженного состояния, текстуры проката и структуры после термической обработки; a_0 – фактор, учитывающий вклад текстуры и структуры; t_{01} и t_{02} – времена задержки взаимно-перпендикулярных поперечных волн в отсутствии напряжений, t_1 и t_2 – времена задержки волн в напряженном состоянии.

Вклад фактора анизотропии, учитывающего текстуру проката и структурное состояние после закалки с отпуском, определяется дополнительными измерениями на фрагментах, вырезанных из соответствующих участков, для каждой плавки.

Исследовали колеса нового изготовления в условиях Выксунского металлургического завода, Нижнетагильского металлургического комбината, вагонных ремонтных депо Арзамас, Нижний Новгород и бывшие в эксплуатации. ЭМА преобразователь перемещали по внутренней поверхности обода с шагом 5 мм от гребня к диску в нескольких сечениях (от 4 до 8). Значения сжимающих напряжений у поверхности катания более 100 исследованных вагонных колес в основном не превышают допустимые и находятся в диапазоне 100...160 МПа. Отклонения по слоям в распределении остаточных напряжений по окружности обода для новых колес достаточно однородно (не превышает 40 МПа). В колесах повышенной твердости, бывших в эксплуатации, наблюдается неравномерное распределение напряжений по окружности обода (разница между минимальным и максимальным значением напряжений по окружности может достигать ~60 МПа).

В термически упрочненных бандажах до посадки напряжения сжатия вблизи поверхностей катания и посадки достигают значений 150 МПа при наличии структур троостита, а в центральной зоне из-за непрокаливаемости имеют место структуры сорбита и напряжения растяжения не превышают 120 МПа. Полученные значения проверены расчетным методом, подтвердившим экспериментальные результаты.

Зависимость параметра акустической анизотропии от расстояния по толщине бандажа определяется особенностями формирования текстуры проката и структуры после термической обработки материала бандажа. Распределение и диапазон значений оцениваемых напряжений во фрагменте бандажа и в свободных бандажах имеют отличия порядка 50 МПа, т.е. измеряемый параметр в свободных бандажах в большей степени определя-

ется текстурой стали. Изменения скорости двух поляризованных волн, распространяющихся в одном слое по толщине бандажа происходят одинаково. Следовательно, влияние структуры, изменяющейся по толщине бандажа, на результат оценки остаточных напряжений не существенно.

В результате напрессовки бандажа на колесный центр растягивающие остаточные напряжения растут в среднем от 100 МПа (вблизи поверхности катания) до 350 МПа (в центральной части и ближе к месту посадки). Следовательно, в процессе реализации натяга на поверхности бандажа вблизи места посадки на колесный центр создаются дополнительные растягивающие напряжения, что в целом повышает уровень напряжений растяжения.

Вблизи поверхности катания наблюдается сниженный уровень напряжений растяжения, что является важным фактором, оказывающим влияние на уменьшение интенсивности изнашивания колес. С удалением от поверхности катания растягивающие напряжения растут, достигая максимума в центральной зоне. Уменьшенное значение растягивающих напряжений вблизи поверхности посадки бандажа, свидетельствует о сниженных уровнях натяга. По уровню напряжений вблизи поверхности посадки бандажей на центры можно контролировать плотность посадки и не допустить проворот и сползание бандажа в процессе эксплуатации подвижного состава,

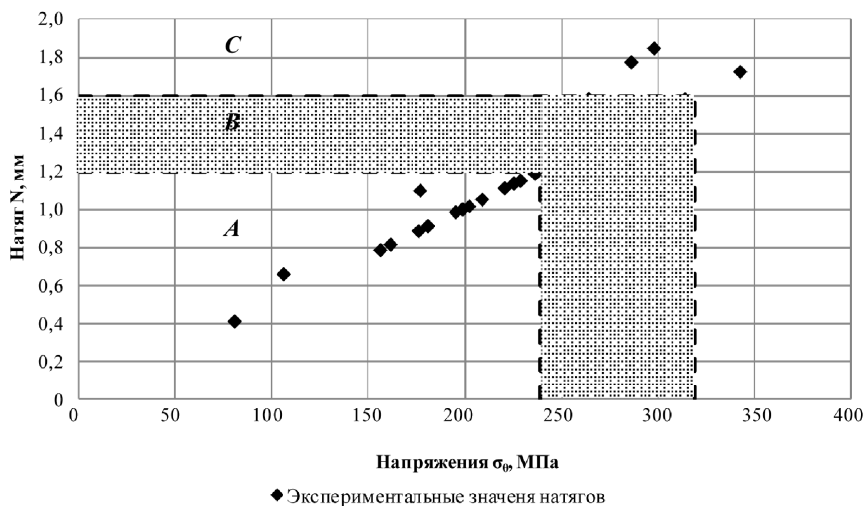


Рис. Зависимость натяга, измеренного прямым методом, от натяга, определенного по измеренным напряжениям:

область «А» соответствует недостаточным значениям натягов (максимальные значения напряжений не достигают 250 МПа); область «В» соответствует натягам бандажей согласно требованиям ЦТ329; в области «С» измеренный натяг и соответствующие ему остаточные напряжения в бандажах превышают регламентируемые

тем самым предотвратить крушение. Оценка остаточных напряжений в центральной части бандажа позволяет оценить уровень остаточных напряжений как после напрессовки, так и накопившихся в процессе эксплуатации, тем самым не допустить разрыва бандажа.

Произведена оценка остаточных напряжений ЭМА методом по высоте рельса и с боковой поверхности шейки рельса. Полученные экспериментально значения напряжений в шейке рельса (до –250 МПа) совпадают с результатами Калакуцкого-Закса-Давиденкова. Интегральная характеристика напряжений, измеренных по высоте рельса (около 30 МПа), может быть использована для оценки компенсирующих растягивающих напряжений в головке и подошве рельса, которые по прямым измерениям составляют до 200 МПа.

Работа выполнена при частичной поддержке:

– Программы инициативных проектов фундаментальных исследований, выполняемых в Учреждении УрО РАН в 2012 – 2014 гг. (регистрационный номер: 12-У-2-1013);

– Программы стратегического развития Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашникова на 2012 – 2016 годы (ПСР/М2/Н2.5/МВВ).

ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД НА МНОГОКРАТНЫХ ОТРАЖЕНИЯХ ПРИ КОНТРОЛЕ ЛИНЕЙНО-ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Муравьева О.В., Стрижак В.А., Злобин Д.В., Соков М.Ю.
*Ижевский государственный технический университет
им. М.Т. Калашникова, г. Ижевск, Россия*

Протяженные объекты, длина которых превышает прочие линейные размеры в сто и более раз, занимают особое место в номенклатуре изделий металлургии и машиностроения. Важной особенностью данных объектов является трудность реализации применительно к ним традиционно используемых контактных ультразвуковых методов, достоверность и воспроизводимость которых зависит от качества обработки поверхностей контролируемых объектов. Вихретоковые и магнитоиндукционные методы, несмотря на преимущество бесконтактной работы, выявляют лишь поверхностные и приповерхностные дефекты. При этом получаемая информация зависит от ряда факторов (зазор, магнитные и электромагнитные характеристики объекта), что приводит к проблемам при идентификации дефектов. Прогрессивным является использование волноводного акустического эхоимпульсного метода. Среди преимуществ волноводного метода – отсутствие необходимости подготовки всей поверхности и сканирования объекта,

существенное сокращение времени контроля, равномерная чувствительность к дефектам, расположенным на различных глубинах.

Дополнительные преимущества позволяет получить использование полностью бесконтактных методик волноводного контроля с использованием электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей. Прежде всего, отсутствие потерь энергии на поглощение контактным датчиком дает возможность применить метод многократных отражений, существенно увеличивающий чувствительность метода к малым дефектам, а также использование дополнительных параметров в качестве информативных (скорость волны, коэффициент затухания, эффективность ЭМА преобразования). В работе представлены возможности использования волноводного и зеркально-теневых методов контроля цилиндрических объектов, основанных на использовании многократных отражений, и реализованных с использованием бесконтактных электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей.

При реализации волноводного контроля прутка с использованием стержневой волны возможно наблюдение серии многократных отражений, зондирующего импульса от дефектов и свободных торцов прутка благодаря отсутствию потерь на расхождение и несущественному затуханию. В качестве примера на рис. 1, *a* представлена серия многократных отражений, полученная при реализации волноводного ЭМА метода на прутке длиной 2 м, диаметром 20 мм.

Разработана модель акустического тракта волноводного метода на многократных отражениях при контроле пруткового проката, основанная на закономерностях распространения стержневых волн в прутках и их взаимодействия с дефектами, учитывающая способ возбуждения и приема стержневой волны, геометрические параметры объекта контроля и модельного отражателя, упругие свойства объекта, рабочую частоту, описываемая следующими формулами:

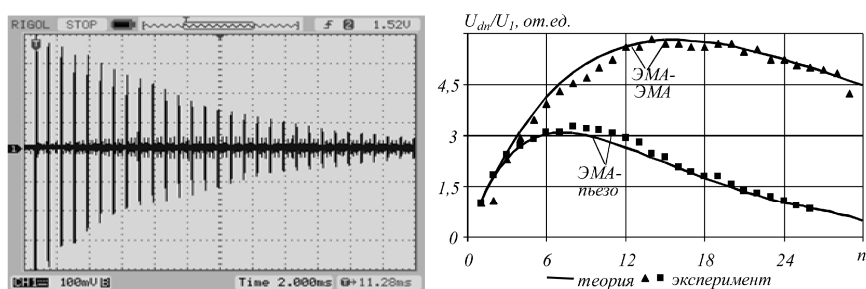


Рис. 1. Примеры дефектограмм многократных отражений в прутке (*a*), относительное изменение амплитуды эхо-сигналов от дефекта U_{dn} в зависимости от номера отражения n

- отраженный n раз от торца импульс стержневой волны U_n :

$$U_n = U_0 D_d^{2n} R_e^{n-1} e^{-2\delta L n}; \quad (1)$$

- амплитуда эхо-сигнала U_{dn} , отраженного от дефекта на n -м отражении:

$$U_{dn} = U_0 n D_d^{2(n-1)} R_d R_e^{n-1} e^{-2\delta L(n-1)} e^{-2\delta l_d}, \quad (2)$$

где R_e – коэффициент отражения от границы торец – преобразователь; R_d и D_d – коэффициенты отражения и прозрачности через дефектный участок δ – коэффициент затухания в объекте; L – длина прутка.

На рисунке 1, б представлены результаты расчета зависимостей изменения относительных амплитуд эхо-сигналов от дефектов U_{dn} , построенные в соответствии с формулами акустического тракта для случаев бесконтактного (ЭМА-ЭМА) и бесконтактно-контактного (ЭМА-пьезо) вариантов. Результаты исследований акустического тракта волноводного метода показали, что чувствительность метода может быть существенно повышена за счет анализа сигнала на многократных отражениях и позволили оценить и оптимизировать параметры метода (количество регистрируемых отражений, чувствительность) при контроле прутков различной длины на различной рабочей частоте и обосновать новые информативные параметры разработанного метода (амплитуда донного сигнала и эхо-сигналов от дефектов, ослабление импульсов многократных отражений; коэффициенты отражения от дефектов на любых отражениях).

Авторами разработана технология ЭМА зеркально-теневого метода на многократных отражениях, реализованная с помощью проходного ЭМА преобразователя, обеспечивающего излучение (прием) поперечных волн с осевой поляризацией во всех радиальных направлениях в поперечном сечении прутка. Благодаря отсутствию потерь на границе преобразователь – объект контроля и меньшему расхождению волны вследствие формирования цилиндрического фронта обеспечивается возможность получения серий многократных отражений по диаметру прутка (рис. 2, а). Браковочным критерием является ослабление сигналов многократных отражений с расстоянием (рис. 2, б), что позволяет существенно повысить чувствительность зеркально-теневого метода. Исследована реальная чувствительность зеркально-теневого метода к дефектам прутков-заготовок из пружинно-рессорной стали, показавшая возможность выявления и надежной локализации внутренних и поверхностных дефектов размерами от 0,1 мм (рис. 2, в).

Следует подчеркнуть, что глубина и раскрытие обнаруженных трещин, размеры включений составляют сотые доли от длины акустической волны на основной частоте спектра зондирующих импульсов в случае волноводного акустического контроля, и десятые доли от длины акустической волны при использовании зеркально-теневого метода на многократных

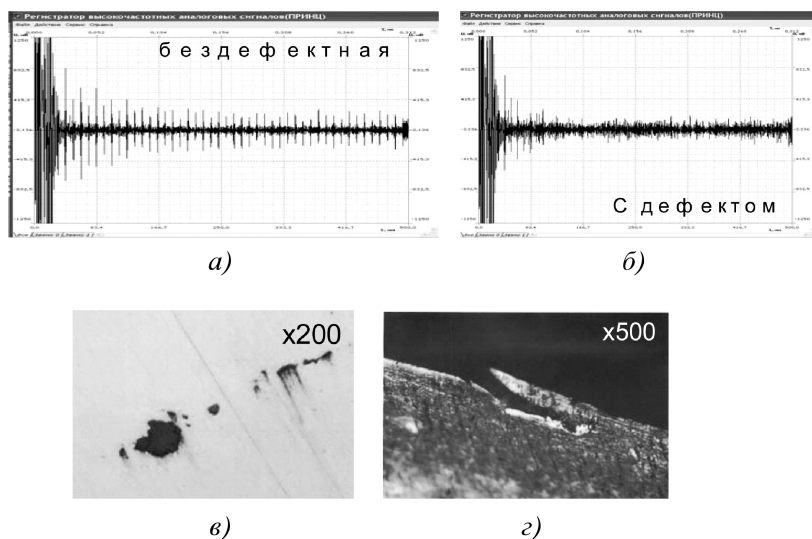


Рис. 2. Осциллограммы многократных отражениях в бездефектной (а) и дефектной (б) областях и обнаруженные дефекты: неметаллическое включение $0,05 \times 0,15$ мм (в), слиточная пленка глубиной $0,07$ мм (г)

отражениях в сравнении с традиционным эхо-методом ультразвукового контроля, позволяющим выявить дефекты, соизмеримые с длиной волны. Разработанные технологии контроля волноводным акустическим и зеркально-теневого методами на многократных отражениях обладают следующими преимуществами:

- высокая реальная чувствительность к внутренним и поверхностным дефектам;
- реализация методов без иммерсионной жидкости и дополнительной подготовки поверхности с обеспечением достаточно высокой производительности контроля;
- высокая достоверность и воспроизводимость результатов контроля за счет отстройки от качества акустического контакта;
- высокая разрешающая способность при локализации дефектов и отсутствие мертвой зоны (для зеркально-теневого метода).

Работа выполнена при частичной поддержке: Программы стратегического развития ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» на 2012 – 2016 гг. (рег. номер ПСР/М2/Н2.5/МВВ); Гранта имени Г.А. Тихонова для аспирантов и молодых ученых (рег. номер ГТ-4-12); Программы инициативных проектов фундаментальных исследований, выполняемых в Учреждении УрО РАН в 2012 – 2014 гг. (рег. номер 12-У-2-1013).

НОВЫЕ СТАНДАРТЫ ИСО В ОБЛАСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Петров А.А.
ОАО «РосЭК», Москва, Россия

Анализ международных (документы международной системы стандартизации ISO [6 – 8]) и отечественных нормативных документов [1 – 5] по ультразвуковому контролю показал схожесть в ряде требований по проведению контроля, таких как общие положения, требования к качеству поверхности и оборудованию для контроля, учету криволинейной поверхности, зон контроля и т.п. Основные отличия отечественных нормативных документов от международных заключается в способе задания чувствительности и оценки допустимости дефектов.

Настройка чувствительности по международным стандартам производится по одному из способов к [7]:

- 1) зависимость амплитуды от расстояния (DAC-кривая) для бокового цилиндрического отверстия $\varnothing 3$ мм;
- 2) опорные уровни с использованием кривых «расстояние-усиление-размер» (DGS, эквивалент APД-диаграммы) от плоскостного отражателя;
- 3) Зависимость амплитуды от расстояния (DAC-кривая) от прямоугольного паза глубиной 1 мм;
- 4) способ «тандем» относительно плоского отверстия $\varnothing 6$ мм.

Боковой цилиндрический отражатель обладает рядом преимуществ, такой отражатель является ненаправленным, применим для преобразователей с различными углами ввода, большим отклонением рабочей частоты от номинального значения, отражатель технологичен в изготовлении, позволяет легко обеспечить воспроизводимость его отражающих свойств.

В национальных стандартах наибольшее распространение получил способ настройки чувствительности по угловому отражателю. Такой типа искусственного отражателя хорошо имитирует непровары и трещины в корне сварного шва – наиболее опасные дефекты. Однако изготовить зарубку не просто, нужно обеспечить перпендикулярность к поверхности, выдержать правильные размеры, достичь определенного качества отражающей поверхности.

В международных и национальных стандартах настройка чувствительности и разбраковка проводится по амплитудному критерию, что приводит к неоправданным потерям на ремонтные работы. Для обеспечения высокой надежности в эксплуатации промышленных объектов решающую роль играет максимально точное описание дефекта. Комбинация информации о характеристиках материала и характеристиках дефекта позволяет более точно производить оценку эксплуатационного ресурса, в том числе при эксплуатации с допустимыми дефектами. Таким образом, актуальным

вопросом является использование стратегии оценки качества, включающую количественную оценку дефекта.

Существующие многоканальные системы ультразвукового контроля основаны на использовании технологии фазированной решетки. Увеличенная разрешающая способность позволяет реконструировать изображение объектов контроля, определять координаты и размеры дефектов. При внедрении технологии фазированной решетки в практику столкнулись с трудностями реализации некоторых требований, предъявляемых к традиционным методам. Основная проблема – это требование нормативно-технической документации по обеспечению одинаковой чувствительности во всем объеме контролируемой зоны. Наличие функции временной регулировки чувствительности не позволяет решить проблему должным образом. В приборе должна быть предусмотрена угловая коррекция, выравнивающая чувствительность во всем диапазоне контролируемого пространства, однако, не все современные дефектоскопы с фазированной антенной решеткой оснащены такой функцией.

Актуальна задача разработки методического документа, регламентирующего проведение ультразвукового контроля дефектоскопом с фазированной решеткой. Методический документ должен устанавливать требования обеспечивающие достоверность и воспроизводимость результатов контроля различными дефектоскопами с антенными решетками.

Для настройки чувствительности по амплитудному критерию и угловой коррекции, выравнивающая чувствительность по всей зоне контроля, целесообразно применять образцы с боковым цилиндрическим отверстием (рис. 1).

С целью определения высоты непровара возможно применять отражатель в виде прямоугольного паза (рис. 2).

Применение нескольких образцов является рентабельным, в качестве альтернативного решения возможно применение образцов с вертикальными цилиндрическими сверлениями. Исследования показали, что данный

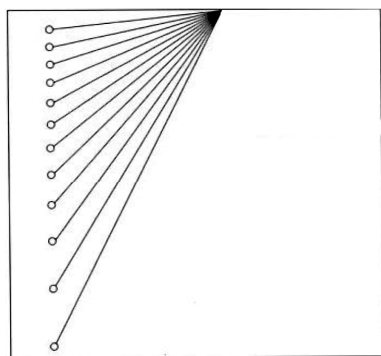


Рис. 1. Образец с боковыми цилиндрическими отверстиями



Рис. 2. Образец с прямоугольным пазом

отражатель позволяет проводить настройку дефектоскопов с фазированной антенной решеткой, как по амплитудному критерию, так и для определения высоты непровара, трещины.

Литература

1. **ГОСТ 14782–86.** Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые.
2. **РД 34.17.302–97 (ОП 501 ЦД–97).** Котлы паровые и водогрейные. Трубопроводы пара и горячей воды, сосуды. Сварные соединения. Контроль качества. Ультразвуковой контроль. Основные положения.
3. **ВСН 012–88.** Строительство магистральных и промышленных трубопроводов. Контроль качества и приемка работ Ч. 1, 2.
4. **РД РОСЭК-001–96.** Машины грузоподъемные. Конструкции металлические. Контроль ультразвуковой. Основные положения.
5. **СТО 00220256-005–2005.** Швы стыковых, угловых и тавровых сварных соединений сосудов и аппаратов, работающих под давлением.
6. **ISO 1666:2010.** Неразрушающие испытания сварных швов. Ультразвуковое испытание – приемочные уровни.
7. **ISO 176406:2010.** Неразрушающие методы контроля сварных швов. Ультразвуковой контроль. Методики, контрольные уровни и анализ результатов.
8. **ISO 23279:2010.** Неразрушающий контроль швов. Ультразвуковой контроль. Классификация индикаций в швах.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Соколов Н.Ю.
ООО «АКС»

Среди технологического и эксплуатационного неразрушающего контроля сварных соединений значительную долю составляет ультразвуковой контроль. Для удовлетворения ежегодно растущей потребности в ультра-

звуковом контроле требуется либо количественное увеличение используемого оборудования и персонала, либо более экономически оправданный качественный переход на новый уровень контроля.

Доклад рассматривает сразу два качественных шага в ультразвуковом контроле – использование антенных решеток вместо классических преобразователей и автоматизацию контроля. Рассмотренные методы с помощью двух антенных решеток позволяют решить большую часть возникающих при контроле сварных швов задач, в том числе измерение истинных или эквивалентных размеров дефектов, подготавливая тем самым базу для решения задачи диагностики. Автоматизация в свою очередь повышает производительность и минимизирует участие человека в процессе, уменьшая тем самым влияние человеческого фактора на достоверность контроля.

Рассмотрен автоматизированный комплекс для контроля сварных швов А2051 Скаут, реализующий все описанные методы контроля и диагностики в автоматическом режиме.

Доклад предназначен для специалистов в области неразрушающего контроля нефтегазовой отрасли, судостроения, машиностроения, и прочих отраслей промышленности.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ТЕЛА ТРУБ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ ПРИ ПОМОЩИ БЕСКОНТАКТНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО СКАНЕРА-ДЕФЕКТОСКОПА А2075 «SoNet»

Суворов В.А.

ООО «Акустические Контрольные Системы», Москва, Россия

Сканер-дефектоскоп ультразвуковой бесконтактный А2075 «SoNet» предназначен для автоматизированного контроля основного металла труб диаметром от 720 до 1420 мм с толщиной стенки от 6 мм при диагностике магистральных газопроводов в процессе капитального ремонта. Сканер обеспечивает выявление в основном металле трубы стресс-коррозионных и коррозионных дефектов, механических повреждений, а также дефектов проката листа с указанием их количества, условных размеров и координат. Благодаря применяемой технологии электромагнитно-акустического преобразования контроль производится без использования контактной жидкости.

В докладе представлено описание принципа действия, элементов конструкции различных поколений прибора, отражен пятилетний опыт применения сканера-дефектоскопа на различных участках газотранспортной системы России.

СОНАР ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ЗВУКОВИДЕНИЯ

Суханов Д.Я., Латипова Л.М.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Россия*

Звуковидение и ультразвуковая томография находят применение в дефектоскопии, медицинской диагностике, задачах обнаружения скрытых предметов. Распространение получили технологии контактной ультразвуковой диагностики, когда ультразвуковой излучатель и приемник плотно прикладываются к исследуемому объекту, либо применяются иммерсионные среды, которые позволяют передавать ультразвуковые волны в исследуемый объект и минимизируют отражение от поверхности объекта. Для исследования поверхности объекта, достаточно осуществлять зондирование через воздух.

В данной работе предлагается метод восстановления ультразвуковых изображений объектов в воздухе с помощью системы ультразвукового зондирования, состоящей из ортогонально размещенных, линейной решетки излучателей и линейной решетки приемников. Данная конфигурация позволяет минимизировать количество излучающих и приемных датчиков при сохранении однозначности восстанавливаемых изображений [1, 2]. На рисунке 1 представлена схема измерений с помощью предложенной установки. В каждый момент времени работает единственный излучатель, а все приемники одновременно измеряют рассеянные волны, затем включается другой излучатель и измерения повторяются. В качестве зондирующих

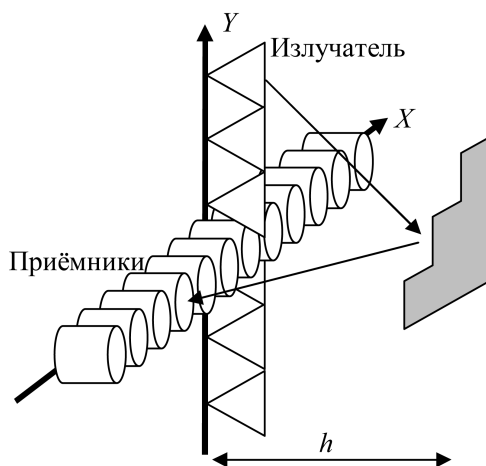


Рис. 1. Схема измерений

сигналов рассмотрим монохроматические сигналы. Если зондирование осуществлять на множестве частот, то будет возможно получать разрешение по дальности.

В приближении однократного рассеяния, можно записать результат измерений, представленной системы, следующим образом:

$$U(x, y) = \iiint_{x_s, y_s, z_s} \rho(x_s, y_s, z_s) \frac{e^{ik\left(\sqrt{z_s^2 + y_s^2 + (x-x_s)^2} + \sqrt{z_s^2 + x_s^2 + (y-y_s)^2}\right)}}{\sqrt{z_s^2 + y_s^2 + (x-x_s)^2} \sqrt{z_s^2 + x_s^2 + (y-y_s)^2}} dx_s dy_s dz_s, \quad (1)$$

где $\rho(x_s, y_s, z_s)$ – безразмерная функция, описывающая распределение рассеивателей в среде, и физически соответствующая отношению рассеянной (в направлении области измерений) волны к падающей волне. $U(x, y)$ -поле в приемника находящегося в точке $(x, 0)$, при работе излучателя находящегося в точке $(0, y)$. Необходимо по результатам измерений $U(x, y)$ восстановить изображение неоднородностей $\rho(x_s, y_s, z_s)$, то есть решить обратную задачу.

Решение обратной задачи для восстановления двумерного изображения основано на методе пространственно-согласованной фильтрации:

$$\rho(x_s, y_s) = \iint U(x, y) e^{ik\left(\sqrt{h^2 + y_s^2 + (x-x_s)^2} + \sqrt{h^2 + x_s^2 + (y-y_s)^2}\right)} dx dy. \quad (2)$$



Рис. 2. Фотография экспериментальной установки

В формуле (2) не учитывается амплитудный множитель в функции Грина, поскольку его влияние на результат незначительно.

Согласно предложенному методу измерений была разработана экспериментальная установка (рис. 2) из 32 ультразвуковых излучателей и 32 приемников, работающих на частоте 40 кГц, размещенных с шагом 1 см.

На рисунке 3 представлен результат измерений косинусной квадратуры поля на частоте 40 кГц для тестового объекта в виде пистолета. По оси x отложена координата приемника, а по оси y координата излучателя. Данные измерений были обработаны с помощью (2) и восстановлено изображение объекта (рис. 4).

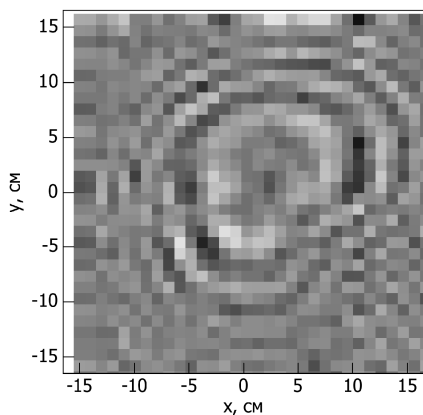


Рис. 3. Измеренное поле

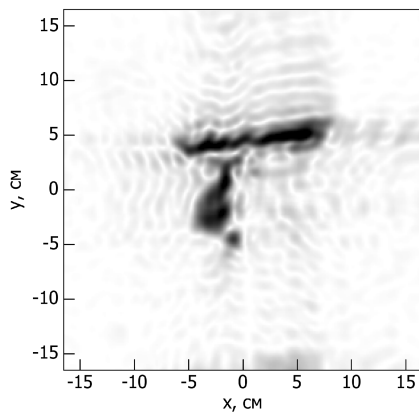


Рис. 4. Восстановленное изображение

По результатам обработки данных измерений видно, что предложенный метод применим для визуализации объектов в воздухе.

Литература

1. Суханов Д.Я., Латипова Л.М. Ультразвуковидение в воздухе с применением крестовидной матрицы ультразвуковых излучателей и приемников // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56, № 8/2. С. 145 – 148.
2. Суханов Д.Я., Латипова Л.М. Ультразвуковое видение в воздухе на основе взаимно-ортогональных линейной решетки излучателей и линейной решетки приемников // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. № 9/1. С. 17 – 21.

РАБОТЫ НТУ «ХПИ» В ОБЛАСТИ НК

Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Глоба С.Н., Ле Чи Хиеу,
Познякова М.Е., Хомяк Ю.В., Десятниченко А.В.
НТУ «ХПИ», Харьков, НТУУ «КПИ», Киев, Украина

Введение

Не смотря на кризисные явления в экономиках стран мира, вопросы разработки и совершенствования средств неразрушающего контроля материалов, изделий, объектов и оборудования остаются актуальными. Особенно важными являются вопросы контроля изделий, которые будут эксплуатироваться в особо ответственных условиях, а также при контроле оборудования, которое находится в эксплуатации длительное время или в условиях воздействия тяжелых внешних и внутренних факторов [1].

Решаемые задачи

Рассмотрены вопросы повышения чувствительности и возможностей ультразвукового контроля, расширения диапазона оценки глубины поверхностных дефектов при наличии грубой необработанной поверхности и расширение диапазона контроля толщины диэлектрических покрытий на металлах.

Основные результаты

1. Усложнение условий эксплуатации подвижного состава требует повышения чувствительности ультразвукового контроля (УЗК) осей железнодорожных вагонов и локомотивов. В настоящее время в основном УЗК ведут иммерсионным методом. При этом требуется обнаруживать внутренние дефекты эквивалентные плоскодонному отражателю диаметром 3 мм и более. По данным эксплуатационников имеется потребность увеличения чувствительности УЗК до 1 мм. Проведенные нами экспериментальные исследования с помощью дефектоскопов УД4-Т и УД2-12 с прямыми преобразователями на частотах до 5 МГц показали, что при традиционных условиях обнаружение таких дефектов проблематично.

Известно [2], что повысить чувствительность возможно за счет применения зондирующих импульсов в виде пакета со значительным числом периодов заполнения заданной частоты. Экспериментальная проверка указанного положения выполнена на образцах заготовок для осей локомотивов, в которых были изготовлены плоскодонные отражатели диаметром 3, 2 и 1 мм. Образец помещался в иммерсионную ванну. Зондирование образца и прием отраженных сигналов осуществлялись серийными пьезоэлектрическими преобразователями (частота 5 МГц). Питание преобразователей осуществлялось специальным генератором, который позволял из-

менять в широких пределах частоту заполнения, длительность и амплитуду напряжения зондирующего импульса. Принятые сигналы усиливались полосовым маломушящим усилителем и подавались на серийный дефектоскоп. Кроме того, для сравнения, эти же пьезоэлектрические преобразователи питались от серийного дефектоскопа импульсами ударного типа. Анализ полученных результатов позволил установить следующее:

а) применение пакетных зондирующих импульсов позволяет существенно повысить чувствительность иммерсионного ультразвукового контроля. Причем, максимум чувствительности обеспечивается при заполнении зондирующего сигнала 6 – 8 периодами используемой частоты;

б) Показано, что, при использовании пьезоэлектрических преобразователей и питании их пакетными импульсами напряжения, для повышения выявляемости моделей дефектов меньшего размера требуется плавная подстройка частоты заполнения в сторону высокочастотной области (рис. 1).

2. Важным вопросом оценки качества оборудования и объектов, находящихся в эксплуатации, является контроль недоступной поверхности, которая может поражаться коррозией. Это емкости для хранения топлива, трубы газотранспортных систем, объекты химической промышленности и др. Для исследования возможности обнаружения дефектов на противоположной стороне изделия (по отношению к поверхности ввода УЗК) мы использовали электромагнитно-акустический (ЭМА) метод возбуждения и приема ультразвуковых импульсов. Контроль производился раздельно-совмещенными ЭМА преобразователями (ЭМАП), высокочастотные катушки которых были выполнены в форме зигзага. Питание возбуждающего индуктора ЭМАП производилось мощным генератором зондирующих им-

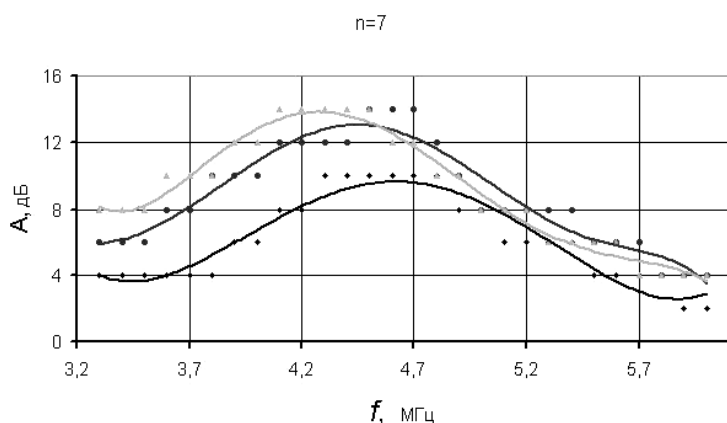


Рис. 1. Зависимость амплитуды сигналов отраженных от моделей дефектов от частоты заполнения ультразвуковых колебаний при количестве импульсов заполнения (длительность) равным 7

пульсов (ГЗИ), описанным в работе [3], а также ГЗИ «Smereka» и другими (рис. 2), изготовленными на кафедре. В качестве объектов исследований выбраны длинномерные листовые образцы различной толщины, изготовленные из ферромагнитных сталей. В образцах были изготовлены модели каверн в виде конических сверлений глубиной 2...2,5 мм. Диаметр сверлений во всех случаях составлял 3 мм. Исследования проводились с использованием эхо метода контроля. Для примера фотографии реализаций приведены на рис. 3. Дефекты находились на расстоянии 150...200 мм от ЭМАП.



Рис. 2. Генераторы зондирующих импульсов для питания ЭМАП пакетными импульсами в диапазоне частот 0,1...23 МГц и формирующие пиковые токи 20...200 А

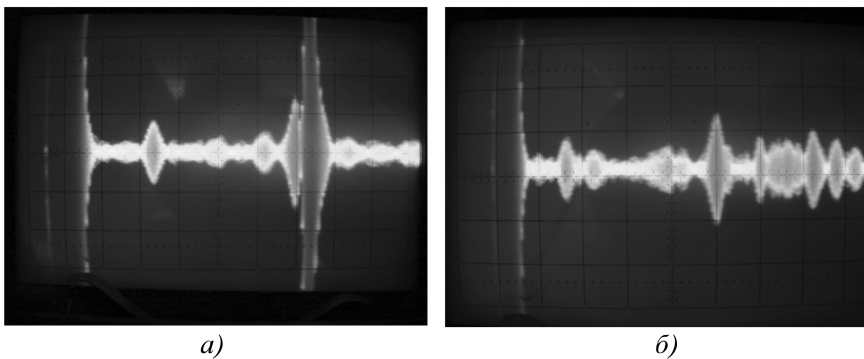


Рис. 3. Реализации с эхо сигналами от моделей дефектов при контроле листа 4 мм (а) и 8 мм (б)

Анализ выполненных исследований позволяет сделать выводы о возможности обнаружения дефектов в изделиях из листового материала на недоступных поверхностях, например резервуарах больших размеров, внутренних поверхностях труб и т.д. ультразвуковым эхо методом.

3. Существенный интерес имеет место при оценке возможности продолжения эксплуатации объектов и оборудования. При этом существуют две сложные задачи. Оценивать глубину возникших или развивающихся поверхностных течин и проводить контроль по поверхности, пораженной коррозией, имеющей исходную неровную поверхность или покрытой защитными покрытиями. Значительным числом известных приборов неразрушающего контроля такие поверхности воспринимаются как дефектные. Как правило, в таком случае для проведения контроля требуется зачистка поверхности, что очень дорого и приводит к потерям металла и энергии. Для решения поставленной задачи нами разработан образец вихретокового дефектоскопа, который позволяет проводить контроль изделий с вышеупомянутыми особенностями, например, непрерывно литых слябов. Кроме того, этим прибором удалось решить задачу оценки глубины дефектов до 20 мм (рис. 4). Дефектоскоп был успешно испытан в условиях меткомбината «Азовсталь» в цехе производства непрерывно литых слябов.

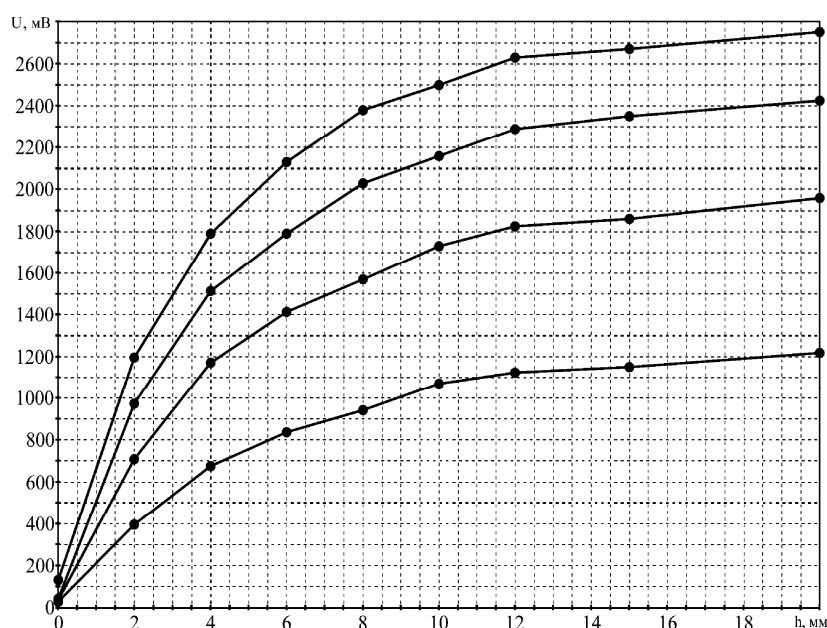


Рис. 4. Зависимость амплитуды полезного сигнала от глубины модели дефекта при различных частотах питания вихретокового преобразователя (снизу вверх 200; 150; 100 и 50 кГц соответственно)

4. Важной составляющей обеспечения безопасной работы оборудования и объектов являются защитные покрытия. Толщины покрытий могут составлять от долей микрометров до десятков миллиметров. При этом нанесение излишнего слоя покрытия приводит к ухудшению защитных свойств и существенным материальным потерям. Недостаточный слой покрытия приводит к преждевременному выходу изделий из эксплуатации. Поэтому требуются приборы и методы для контроля толщины неэлектропроводных покрытий на электропроводных изделиях и объектах.

Для обеспечения широкодиапазонного контроля толщины нами разработан преобразователь, схематическое изображение которого показано на рис. 5. Работает устройство следующим образом. Преобразователь помещается на поверхность покрытия таким образом, что рабочие участки 3 и 4 возбуждающей катушки 1 и приемной катушки 2 соответственно обращены к изделию 5. В возбуждающей катушке 1 инициируют высокочастотный ток $I = I_0 \sin \omega t$ (или импульсный ток с заданными характеристиками). В поверхностном слое изделия 5 под покрытием 6 толщиной h формируется вихревой ток. Взаимодействие возбуждающего электромагнитного поля и электромагнитного поля созданного вихревым током приводит к возбуждению в приемной катушке 2 ЭДС, амплитуда которой зависит от толщины покрытия 6. Сравнивая полученное значение амплитуды с калибровочной зависимостью, определяют толщину h покрытия. Переносят вихретоковый преобразователь на другую точку поверхности изделия и повторяют контроль. Таким образом, путем сканирования выполняется контроль толщины покрытия на всей поверхности изделия.

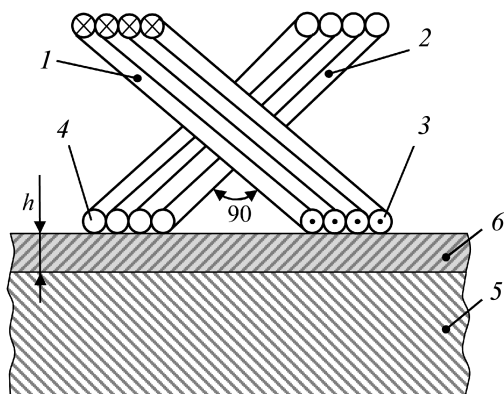


Рис. 5. Схема, поясняющая принцип работы широкодиапазонного компенсированного вихретокового преобразователя для контроля толщины диэлектрических покрытий на металлах

Выполнены исследования работы предложенного преобразователя при различных материалах подложки (сталь, алюминий, медь, свинец и др.). Установлено, что вихретоковый преобразователь позволяет контролировать толщину покрытий в диапазоне от долей микрометра до 50 мм.

Литература

1. **Неразрушающий** контроль: Справочник: в 8 т. под общ. ред. академика РАН В.В. Клюева. М.: Машиностроение.
2. **Себко В.П., Сучков Г.М., Алексеев Е.А.** Оптимизация параметров ЭМА толщиномеров для контроля тонкостенных изделий // Дефектоскопия. 2002. № 12. С. 21 – 28.
3. **Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Чередниченко И.В. и др.** Генератор зондирующих импульсов для ЭМА дефектоскопов // Дефектоскопия. 2012. № 9. С. 42 – 47.

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОРОГА УРОВНЯ СИГНАЛОВ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РАСШИФРОВКЕ ДЕФЕКТОГРАММ АПК «АСТРА»

Тарабрин В.Ф., Кузьмин Е.В., Горбунов О.Е., Зверев А.В.
ЗАО «Фирма ТВЕМА», Москва, Россия

Работа посвящена вопросам автоматической расшифровки дефектограмм при неразрушающем контроле (НК) рельсов.

Для обеспечения безопасности на железных дорогах за счет своевременного обнаружения дефектов проводится комплекс мероприятий неразрушающего контроля, совершенствуется оборудование и программное обеспечение. В состав оборудования вводятся новые типы датчиков (например, вихретоковые), усложняются схемы прозвучивания (увеличивается количество каналов с различными углами ввода и разворота для максимального охвата профиля рельса), увеличивается чувствительность, максимальная скорость контроля. Все это увеличивает количество информации и сложность ручного анализа данных, что, в свою очередь, делает актуальной задачу автоматической расшифровки дефектограмм и определения конструктивных элементов и дефектов с последующей их классификацией. На решение этой задачи направлен аппаратно-программный комплекс (АПК) «АСТРА», основными функциями которого являются отображение данных от разных средств НК и их автоматическая расшифровка.

Данная работа посвящена вопросу определения динамического порога уровня сигналов при автоматической расшифровке дефектограмм высоко-разрядных средств НК, в которых амплитуда сигнала кодируется 8 битами

и выше. К таким средствам относится дефектоскоп «Эхо-комплекс 2», в котором амплитуда сигналов кодируется 8 битами. У этого средства большая часть дефектограммы заполнена сигналами с малой амплитудой (незначительные электрические помехи, акустический шум и т.д.), что приводит к необходимости определения уровня амплитуды полезных сигналов.

Статический порог не является приемлемым, так как, очевидно, могут быть пропущены протяженные полезные сигналы с меньшей амплитудой. Это может быть связано как с особенностями самого дефекта (его залеганием в металле и наличием отражающих граней), так и с настройками оборудования. Поэтому при автоматической расшифровке дефектограмм предлагается в алгоритмах анализа данных реализовывать определение динамического порога для каждого канала и учитывать сигналы с амплитудой не меньше полученного значения.

В ходе работы было отмечено, что график количественного распределения сигналов по уровням имеет вид несимметричного колокола сильно смещенного к началу координат (см. рис. 3). При этом непосредственно сам колокол формируется главным образом из сигналов, которые являются шумом. Отсюда следует, что выбор порогового значения уровня сигналов целесообразно осуществлять из области правого подножия колокола. Для этого могут быть использованы:

- 1) среднее отклонение или среднеквадратическое отклонение уровней сигналов от координаты вершины или центра тяжести колокола;
- 2) усечение колокола на отметке среднего арифметического значения количества сигналов, приходящегося на один уровень;
- 3) факт небольшой разницы между соседними точками графика после подножия колокола.

Ниже на рисунках представлены фрагменты дефектограмм в области стыка рельса для канала 70° до и после фильтрации по динамическому пороговому значению амплитуды, равному 60, найденному по подножию колокола графика количественного распределения сигналов по уровням.

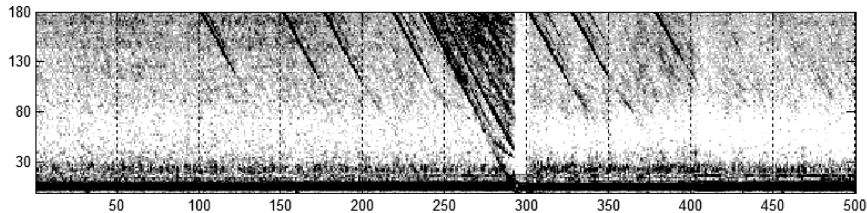


Рис. 1. Фрагмент дефектограммы в области стыка для канала 70° (500 циклов зондирования, соответствующие 2,5 м, с длительностью регистрации эхо-сигнала 0...180 мкс и чувствительностью в 256 уровней). Светлые точки соответствуют сигналам с меньшей амплитудой, темные – с большей

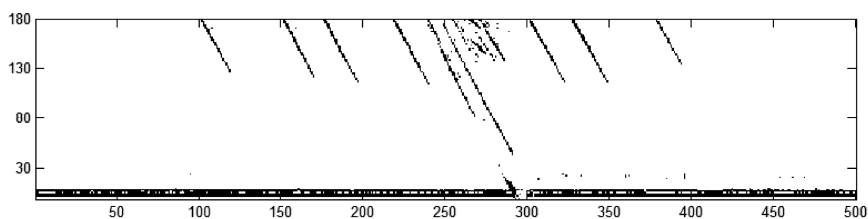


Рис. 2. Фрагмент дефектограммы в области стыка для канала 70° из рис. 1 после фильтрации по динамическому порогу (удалены все сигналы, амплитуда которых меньше динамического порога)

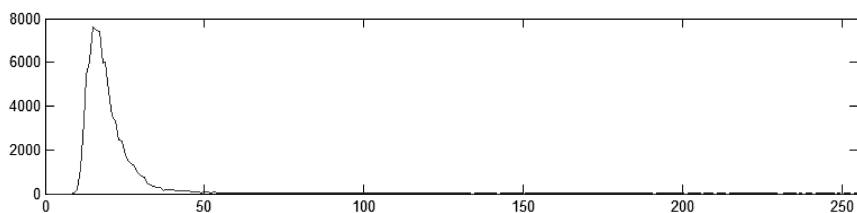


Рис. 3. График количественного распределения сигналов с различной амплитудой (от 0 до 255) для дефектограммы на рис. 1

На основе предложенного подхода был реализован алгоритм определения динамического порога, который показал хорошие результаты на всех контрольных экспериментальных данных, в том числе с сильными акустическими и электрическими помехами. В результате работы алгоритма были оставлены все полезные сигналы от конструктивных элементов и дефектов. Полученный способ определения порогового значения амплитуды сигнала индивидуально для каждого канала позволяет эффективно проводить дальнейший анализ дефектограмм при неразрушающем контроле рельсов.

Литература

1. **Марков А.А., Шпагин Д.А.** Ультразвуковая дефектоскопия рельсов. СПб.: «Образование – Культура». 1999. 230 с.
2. **Сергиенко А.Б.** Цифровая обработка сигналов. Изд. 2-е. СПб.: Питер, 2007. 751 с.
3. **Тарабрин В.Ф., Зверев А.В., Горбунов О.Е.** Аппаратно-программный комплекс «АСТРА» для регистрации и расшифровки результатов комплексной диагностики рельсового пути // Контроль. Диагностика. 2013. № 10 (октябрь). С. 33 – 47.

О СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЯХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТЕЙ

Чуприн В.А.

ООО «НПК «ЛУЧ», Балашиха, Московская область, Россия

Доклад посвящен вопросу оценки систематических погрешностей ультразвуковых приборов для автоматического измерения кинематической вязкости жидкостей.

Важнейшей трибологической характеристикой смазочных жидкостей являются их сдвиговая η_s и кинематическая ν вязкости. В процессе эксплуатации различного оборудования создается своеобразная связанная система: смазывающая жидкость – машина. С одной стороны, свойства смазывающей жидкости оказывают существенное влияние на надежность работы машины, а с другой – актуальное техническое состояние машины определяет степень и скорость ухудшения параметров смазывающих жидкостей. Поэтому сравнение актуальных численных значений обеих вязкостей с их первоначальными значениями и анализ кинетики этих изменений являются источниками in-line диагностики как актуального состояния смазывающей жидкости (соответствие нормативным требованиям), так и технического состояния механических узлов машин и устройств. Для этих целей могут быть с успехом использованы ультразвуковые измерения, имеющие много важных преимуществ перед другими методами [1 – 3]. Однако существенным препятствием на пути их широкого внедрения является отсутствие анализа возможных погрешностей, возникающих при вычислениях вязкости из данных ультразвуковых измерений. В настоящей работе анализируется эта важнейшая составляющая систематических погрешностей ультразвукового метода.

Как показано в [1 – 3], полную систему уравнений, из которых рассчитываются сдвиговая и кинематическая вязкости, можно составить из результатов измерений следующих акустических параметров жидкости: продольный и сдвиговый импедансы Z_L^L , Z_S^L , и скорость распространения c_L^L и коэффициент поглощения звука α . Конкретная функциональная связь между этими величинами и характеристиками жидкости задается выбранной моделью. Однако проблема состоит в том, что при обработке экспериментальных данных возможен выход за пределы применимости выбранной модели, так как эти пределы с достаточной для практических целей точностью неизвестны. В этом случае в найденных из ультразвуковых данных значениях сдвиговой вязкости и плотности жидкости могут возникнуть значительные систематические погрешности, под которыми понимают отклонения от табличных значений, полученных одним из стандартизован-

ных способов, например, капиллярным вискозиметром или вискозиметром с вращающимся диском/цилиндром.

Поэтому для выявления систематических погрешностей выбирались жидкости с различными вязкостями, для которых имелись надежные табличные значения вязкостей и плотностей. В качестве таких жидкостей были выбраны смеси глицерин – вода, табличные значения которых для сдвиговой вязкости и плотности составляли 0,01...10 Пуаз и 1...1,26 г/см³ соответственно [4, 5]. В каждой из жидкостей были измерены вышеперечисленные акустические параметры на частотах 1,0; 1,7 и 2,5 МГц. Скорость звука c_l^L и коэффициент поглощения α в жидкости измерялись эхоимпульсным методом на тех же частотах. Продольный и сдвиговый импедансы Z_l^L , Z_s^L измерялись в соответствии с разработанными в [1 – 3] методиками, основанными на измерениях в тонком волноводе, погруженном некоторой своей частью в жидкость, коэффициентов затухания нулевых мод нормальных волн с горизонтальной α_{SH}^W и вертикальной α_{Lamb}^W поляризациями. Одновременно измерялась также и скорость распространения нулевой моды симметричной волны Лэмба c_{Lamb}^{sim} . Это позволило увеличить чувствительность импеданса к изменениям вязкости и плотности жидкости на 2-3 порядка.

Чтобы из измеренных значений обоих импедансов и скорости звука рассчитать обе вязкости, необходимо конкретизировать модель, позволяющую связать акустические импедансы с параметрами жидкости. Наиболее часто для описания акустических свойств жидкости используется предположение, что жидкость может рассматриваться как ньютоновская. В этом приближении связь вязкостей с измеренными импедансами жидкости имеет вид [1, 6]:

$$\eta_s = \frac{2(Z_s^L)^2}{k_l^L Z_l^L}; \quad \nu = \frac{2(Z_s^L)^2 c_l^L}{k_l^L (Z_l^L)^2}, \quad (1)$$

При этом последние рассчитываются непосредственно из экспериментальных данных:

$$\alpha_{HP} = \frac{Z_s^L}{2dZ_s^W}, \quad \alpha_{Lamb} = \frac{Z_l^L (k_s^W)^3 (q_{sim})^2 d}{8Z_{Lamb}^W (\beta_{sim}^0)^3 \sqrt{1 - (c_l^L / c_{Lamb}^{sim})^2}}, \quad (2)$$

где $Z_{Lamb}^W = \rho^W c_{Lamb}^{sim}$, ρ^W – плотность волновода, $2d$ – толщина волновода, $\beta_{sim}^0 = \omega / c_{Lamb}^{sim}$, $k_s^W = \omega / c_s^W$, c_s^W – скорость сдвиговой волны в волноводе, $q_{sim} = \sqrt{(\beta_{sim}^0)^2 - (k_l^W)^2}$.

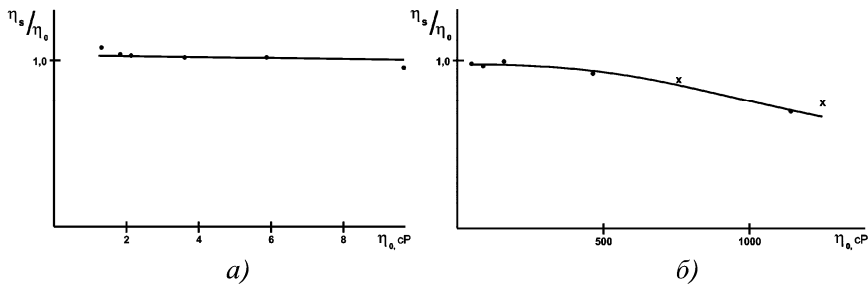


Рис. 1. Сравнение измеренных и табличных значений сдвиговой вязкости

Результаты сравнения рассчитанных из (1)–(2) на частоте 1,7 МГц численных значений сдвиговой вязкости η_s с табличными значениями η_0 представлены на рис. 1. Аналогичные результаты наблюдаются и для кинематической вязкости.

Результаты расчетов вязкостей из акустических измерений на частотах 1 МГц и 2,5 МГц практически повторяют зависимости, представленные на рис. 1. Однако на частоте 2,5 МГц наблюдаются отличия абсолютных значений на 10...15 %, что, вероятно, связано с влиянием шероховатости поверхности волновода. На этот же рисунок нанесены результаты измерений в других жидких средах, полученные в [7] на частоте 2 МГц (крестики на рис. 1, б), где в качестве информативного параметра использовались изменения в фазе коэффициента отражения, вызванные контактом жидкости.

Суммируя полученные можно утверждать, что вплоть до значений сдвиговой вязкости $\approx 1,5...2$ Пуаза акустические методы измерения могут быть использованы без введения поправок. Однако при больших вязкостях введение поправок необходимо. Учитывая то обстоятельство, что идентичные отклонения измеренных и табличных значений вязкостей наблюдались нами и в [7] на жидкостях различной физико-химической природы, можно полагать, что до вязкостей 10...12 Пуаза характер отклонений и величина необходимых поправок не зависят от природы жидкостей, имеют достаточно универсальный характер и определяются только вязкостью жидкостей.

Литература

1. Гитис М.Б., Чуприн В.А. Применение ультразвуковых поверхностных и нормальных волн для измерений параметров технических жидкостей. 1. Измерение сдвиговой вязкости // ЖТФ. 2012. Т. 82, № 5. С. 93 – 99.
2. Гитис М.Б., Чуприн В.А. Применение ультразвуковых поверхностных и нормальных волн для измерений параметров технических жидкостей. 2. Измерение плотности // ЖТФ. 2012. Т. 82, № 5. С. 100 – 105.

3. **Chuprin V., Gitis M.** Measurements of the Material Properties of Liquids Using Normal Acoustic Plate Waves / Proceed. 18th World Confer. NDT. 2012. Durban.

4. **Segur J.B., Oberstar H.** Viscosity of Glycerol and its Aqueous Solutions // Ind. & Eng. Chem. 1951. V. 43. P. 2117 – 2120.

5. **Shell Chem. Corp.**, Technical report 115 – 155. P. 21.

6. **Чуприн В.А.** Влияние жидкости на параметры нормальных волн в плоском волноводе, погруженном в жидкость // Контроль. Диагностика. 2013. № 10. С. 71 – 75.

7. **Shah V.V., Balasubramaniam K.** Measuring Newtonian Viscosity from the Phase of Reflected Ultrasonic Shear Wave // Ultrasonics. 2000. V. 38. P. 921 – 927.

ОСОБЕННОСТИ АКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ СДВИГОВОЙ ВЯЗКОСТИ И ПЛОТНОСТИ ЖИДКОСТЕЙ

Чуприн В.А.

ООО «НПК «ЛУЧ», Балашиха, Московская область, Россия

Доклад посвящен изучению особенностей акустического тракта ультразвуковых измерителей сдвиговой вязкости и плотности жидкостей.

Измерительные устройства для реализации измерений сдвиговой вязкости и плотности жидкостей должны удовлетворять достаточно сложным требованиям: высокая чувствительность и точность, способность первичных преобразователей выполнять измерения при высоких температурах и давлениях, возможность автоматических и непрерывных во времени измерений, конструктивные возможности интеграции первичных преобразователей в работающее машинное оборудование. Удовлетворить таким требованиям с помощью стандартных вискозиметров достаточно сложно. Поэтому для in-line оценки состояния смазывающих жидкостей во время эксплуатации все большее применение находят ультразвуковые методы. Теоретические оценки и эксперименты [1 – 3] показывают, что применение для этих целей нормальных волн (НВ), распространяющихся в волноводах, частично погруженных в исследуемую жидкость, обеспечивают наиболее высокую разрешающую способность и точность измерений обоих импедансов жидкости. Настоящая работа посвящена исследованию преимуществ и недостатков различных способов возбуждения НВ в тонких непьезоэлектрических волноводах с точки зрения возможности их применения для автоматического контроля параметров жидкостей.

Наиболее распространенным [4, 5] является возбуждение/прием НВ с помощью наклонных ультразвуковых пьезопреобразователей (ПЭП), которые возбуждают или принимают либо НВ вертикальной поляризации

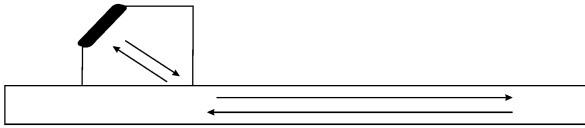


Рис. 1

(НВВП), либо НВ горизонтальной поляризации (НВГП) (рис. 1) и с помощью прямых ультразвуковых ПЭП объемных (продольных либо поперечных) волн 1 (рис. 2), приклеенных к поверхности волновода и излучающих в направлении, перпендикулярном своей оси.

При реализации контроля свойств жидкостей возникают некоторые специфические требования. Наиболее существенными из них являются обеспечение максимальной амплитуды информативных сигналов, контроль временной стабильности электроакустического тракта, возможность измерения акустических импедансов жидкости на нескольких частотах. Как видно из рис. 1 и 2 информативным сигналом является эхо-сигнал, отраженный от противоположного преобразователю торца волновода (при измерениях вязкости и плотности эта часть волновода погружается в исследуемую жидкость). Как показали эксперименты, возбуждение НВ с помощью преобразования объемных волн (рис. 2) обладает несомненным преимуществом с точки зрения выбора опорного сигнала. В этом случае опорным может быть сигнал, отраженный от ближнего к преобразователю торца волновода, в то время как при применении наклонных преобразователей необходим отражатель, специально созданный в волноводе.

Для оценки эффективности преобразователей с точки зрения достижения максимальной амплитуды информативного сигнала использовался генератор пачек прямоугольных импульсов. Количество импульсов в пачке и их длительность могли регулироваться в пределах 1...14 и 0,02...5 мкс соответственно. Преобразователи НВВП имели толщинный резонанс на частоте 1,7 МГц, а НВГП – на частоте 1 МГц. Амплитуды принимаемых сигналов и времена их прихода измерялись с помощью осциллографа LeCroy WaveJet 322, погрешность измерений которого в соответствии с паспортными данными равна $\pm 2,5\%$. Сравнение амплитуд эхо-сигналов НВВП и НВГП при их возбуждении либо наклонным ПЭП либо одним преобразователем продольных или сдвиговых волн показывает большую эффективность первого способа, особенно при возбуждении нулевой моды волны

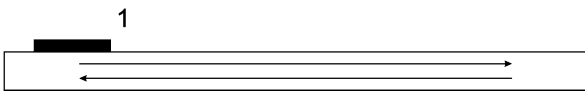


Рис. 2

Лэмба. В то время как отношение амплитуд эхо-сигналов НВГП не превышало ≈ 2 , для НВВП оно составляло ≈ 5 . Можно полагать, что такое малоэффективное возбуждение симметричной НВВП прямым преобразователем связано с тем, что требуемые для симметричной нормальной волны граничные условия при таком возбуждении не выполняются. Наблюдать антисимметричную нулевую моду НВВП, возбужденную с помощью наклонного преобразователя, не удастся, вероятно, из-за сильного демпфирования поверхности волновода протяженной поверхностью призмы. В то же время прямой преобразователь эту волну возбуждает, однако недостаточно эффективно для практического использования.

Для исследования возможности повышения эффективности возбуждения симметричной и антисимметричной нулевой моды НВВП прямым преобразователем на обеих поверхностях волновода симметрично было размещено два прямых преобразователя (рис. 3, преобразователи 1 и 2), излучающих продольные волны навстречу друг другу. Для возбуждения/приема симметричной НВВП оба прямых преобразователя подключались к генератору параллельно, а для антисимметричной НВВП – антипараллельно. Легко видеть, что в этом случае в области возбуждения волн создаются упругие смещения, совпадающие со смещениями, которые создает симметричная НВВП в волноводе при своем распространении в первом случае и антисимметричная – во втором. В результате при тех же параметрах генератора амплитуда нулевой моды симметричной НВВП возрастает в 5 раз, а антисимметричной в 3 раза.

Кроме того, сравнивались возможности многочастотного возбуждения нормальных волн за счет использования нетолщинных мод колебаний ПЭП. Это достигалось варьированием длительности импульсов в пачке при неизменном количестве импульсов и постоянной амплитуде. Эффективно возбудить низкочастотные НВГП не удалось ни в одном из исследованных способов. Наиболее эффективно возбуждаются НВВП за счет возбуждения низкочастотных мод колебаний ПЭП в 2 прямых преобразователях, расположенных по обе стороны волновода (рис. 3). В частности, таким образом, наряду с симметричными модами, удалось возбудить на частоте 240 кГц антисимметричную моду волны Лэмба с амплитудой того же порядка, что и при использовании толщинных колебаний. Низкочастотное возбуждение НВВП наклонным преобразователем оказывается малоэффективным и сопровождается многочисленными шумами.

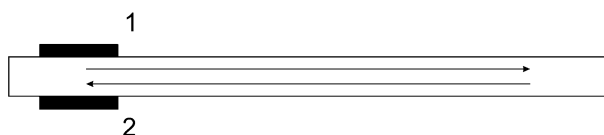


Рис. 3

Литература

1. Гитис М.Б., Чуприн В.А. Применение ультразвуковых поверхностных и нормальных волн для измерений параметров технических жидкостей. 1. Измерение сдвиговой вязкости // ЖТФ. 2012. Т. 82, № 5. С. 93 – 99.
2. Гитис М.Б., Чуприн В.А. Применение ультразвуковых поверхностных и нормальных волн для измерений параметров технических жидкостей. 2. Измерение плотности // ЖТФ. 2012. Т. 82, № 5. С. 100 – 105.
3. Chuprin V., Gitis M. Measurements of the Material Properties of Liquids Using Normal Acoustic Plate Waves / Proc. 18th World Confer. NDT. 2012. Durban.
4. Микер Т., Мейтцлер А. Волноводное распространение в протяженных цилиндрах и пластинках // Физическая акустика / под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1966. Т. 1, Ч. А. С. 140 – 203.
5. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. 168 с.

К ВОПРОСУ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАКЛОННЫХ СОВМЕЩЕННЫХ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ЧАСТОТУ 10 МГц

Чуприн В.А., Застава А.П., Васильев В.А.
ООО «НПК Луч», Москва, Россия

Достоверность информации получаемой при ультразвуковом контроле во многом зависит от точности определения метрологических характеристик средств контроля, в том числе угла ввода и частоты пьезоэлектрический преобразователей (ПЭП).

Проверку ПЭП с дефектоскопом обычно проводят с помощью стандартных образцов типа СО-1 (угол призмы, диапазон контроля и т.д.), СО-2 (угол ввода и т.д.) и СО-3 (стрела и частота). При этом затухание УЗК в материале образца СО1 проверяется на частоте 2,5 МГц [1], а требования к затуханию УЗК в материале СО-2 и СО-3 отсутствуют.

На рисунке 1 приведены усредненные значения углов ввода ПЭП на частоту 10 МГц с углом ввода 65, 70 и 74°, измеренные с использованием двух образцов СО-2 (фирм А и Б) и образец V2 [2], а на рис. 2 приведены усредненные значения частоты этих ПЭП, измеренные с использованием образцов СО-3 этих же фирм и V2.

Из приведенных данных видно:

– значения угла ввода, полученные при использовании образца V2, превышают значения, полученные при использовании образцов СО-2, на 2...4° в зависимости от номинального значения;

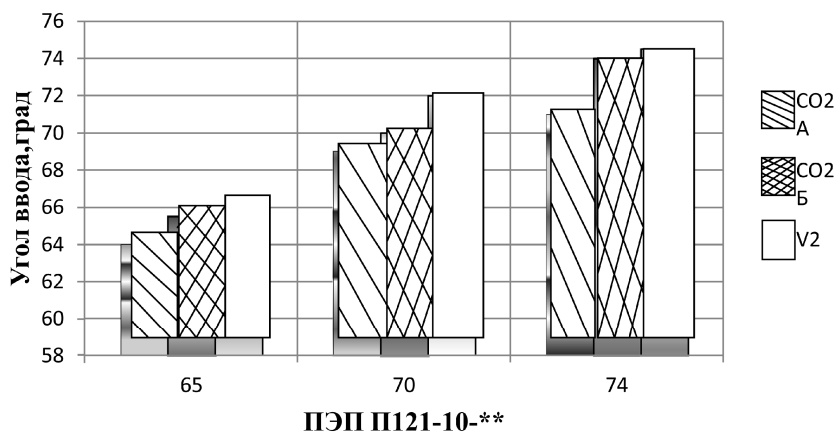


Рис. 1. Значение угла ввода наклонных ПЭП частотой 10 МГц

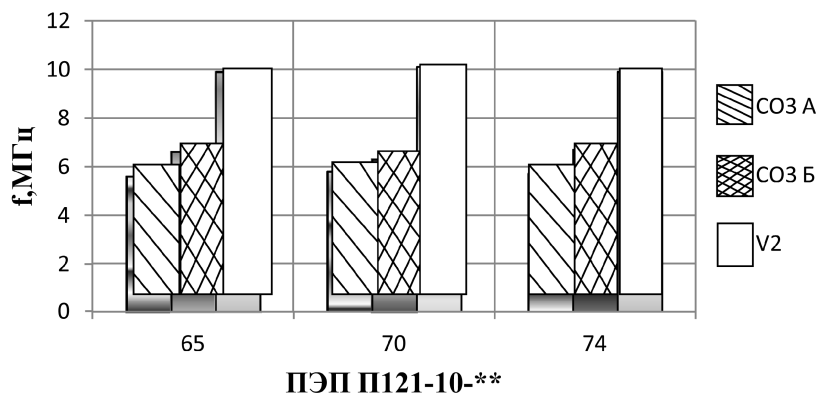


Рис. 2. Значение частоты преобразователей

- значения угла ввода, полученные при использовании двух образцов СО-2, различаются на 1...3°;
- значения частоты ПЭП, измеренной с использованием образцов СО-3 и V2, отличаются более чем на 3,5 МГц;
- значения частоты, измеренной с использованием двух образцов СО-3, различаются на 1 МГц.

Полученные данные обусловлены значительным затуханием УЗК в образцах СО-2 и СО-3. В подтверждении сказанного на рис. 3 приведены значения амплитуд эхо-сигналов, полученные при проверке частоты по образцам СО-3 и V2 ($R = 50$ мм). Измерения проводили при ширине полосы пропускания усилителя от 4 до 10 МГц. Разница амплитуд вышеуказанных сигналов достигает 30 дБ.

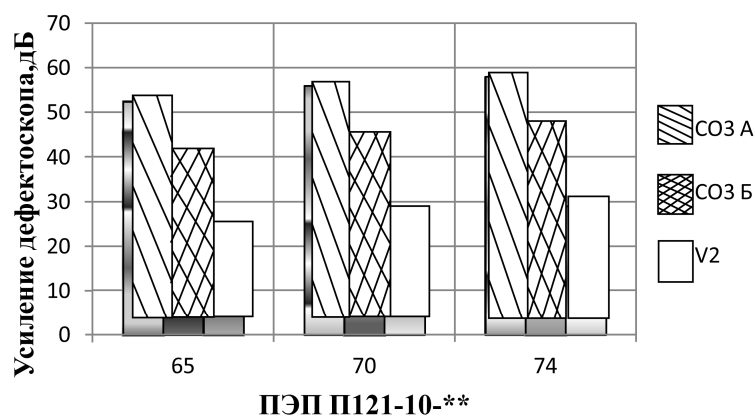


Рис. 3. Значения амплитуд эхо – сигналов от СО3 и V2

Выводы

1. Измерения угла ввода и частоты ПЭП на частоту 10 МГц следует проводить с использованием образца V2.
2. Использование образцов СО-2 и СО-3 для измерения угла ввода и частоты высокочастотных ПЭП (10 МГц) возможно только после введения требований по затуханию УЗК в материалах стандартных образцов и пересмотра технологии их изготовления.

Литература

1. **ГОСТ 14782–86.** Контроль неразрушающий соединения сварные методы ультразвуковые. М., 1986.
2. **EN 27 963.** Welds in steel – Calibration Block No. 2 for Ultrasonic Examination of Welds (ISO 7963:1985).

СЕКЦИЯ 4. РАДИАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ НК И ТД

Руководители секции: Артемьев Б.В., Кузелев Н.Р.

ДИСТАНЦИОННОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ СИСТЕМ РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ НА ПРОИЗВОДСТВЕ

Артемьев Б.В.¹, Артемьев И.Б.², Созонтов А.Н.³

¹ЗАО «НИИИИИ МНПО «Спектр»,

²МГТУ им. Баумана,

³КЗОЦМ

Большая часть современных систем и приборов для неразрушающего контроля и технической диагностики построены на базе цифровых технологий, что позволяет не только тиражировать результаты контроля рассылая их по телекоммуникационным сетям, но и дистанционно контролировать их техническое состояние, осуществлять авторский надзор и проводить расширенное тестирование. Любая современная фирма заинтересована в увеличении продаж производимого оборудования и как следствие расширении географии поставок, а наметившаяся в последние десятилетия международная интеграция позволяет поставлять производимое оборудование в различные страны. Как правило, оборудование приобретается при условии поддержки производителем его работоспособности на весь период гарантийного и пост гарантийного обслуживания, т.е. не менее десяти лет. Даже самое высококачественное оборудование при интенсивной эксплуатации, ввиду ошибок операторов или развития внутренних скрытых дефектов, периодически выходит из строя. На этапе внедрения, когда потребителю поступает новейшее оборудование, в процессе первичной эксплуатации порой выявляются различные недоработки. Их устранение силами потребителя невозможно и требует присутствия разработчика. Стандартное решение – открытие в регионе сервисного центра экономически не оправдано, если оборудование высококачественное и сбои и отказы в его работе происходят редко, а поставки в регион не носят массового характера. Предлагаемое решение позволило избежать выезда специалистов для проведения диагностики на предприятия. Обсуждается опыт десятилетней эксплуатации на заводе КЗОЦМ Уральской горно-металлургической компании.

РАДИОГРАФИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЦИФРОВЫХ МАТРИЧНЫХ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СТАЛЬНЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ

Бабиков С.А., Батрагин А.В.
*Национальный исследовательский
Томский политехнический университет, Томск, Россия*

Введение

Применение цифровых детекторов: плоско-панельных детекторов и запоминающих пластин в настоящее время непрерывно расширяется. В международной практике их применение уже стандартизовано для контроля сварных соединений. Характеристики цифровых детекторов: разрешающая способность и контрастная чувствительность непрерывно улучшаются. К тому же, работа с цифровым изображением дает большую гибкость с точки зрения хранения и передачи результатов контроля, нежели пленочные изображения. Однако, производители далеко не всегда приводят необходимые сведения о радиографических свойствах своих устройств согласно действующим стандартам, поэтому каждое устройство требует, своего рода, входного контроля.

В работе представлены результаты исследования радиографических свойств различных цифровых матричных детекторов с точки зрения рентгеновского контроля изделий из стали и алюминия. Радиографические свойства: пространственное разрешение, контрастная чувствительность и отношение «сигнал–шум» измерялись согласно действующему стандарту ISO 17636-2:2013 Неразрушающий контроль сварных соединений. Радиографический метод. Часть 2: Рентгеновское и гамма-излучение с применением цифровых детекторов [1]. Все детекторы были классифицированы по ISO 17636-2:2013 на соответствие базовому классу чувствительности (класс А) или улучшенному классу чувствительности (класс В).

Методика и оборудование

Эксперименты проводились на оборудовании, представленном в табл. 1.

В качестве объектов контроля использовались пластины из низкоуглеродистой стали и алюминиевого сплава АМг5 толщиной 10 и 20 мм. В качестве индикаторов качества изображения (IQI, image quality indicator) использовались проволочные и дуплексные эталоны чувствительности по EN 462 и ISO 19232:2013 [2, 3]. Применялась схема контроля через одну стенку. Расстояние от источника до объекта составляло 1 м. Объект помещался перпендикулярно к источнику. Фильтры не использовались. Контроль проводился сразу для двух толщин за одну экспозицию.

1. Исследуемые цифровые матричные детекторы с использованными источниками излучения

Детектор	Размер пикселя, мкм	Размер активной зоны, мм	Число активных пикселей	Экспозиция, с	Источник излучения
Hamamatsu C7942CA-02	50	120×120	2240×2344	до 0,44*	РАП-300-5
DRTECH Flaatz 560	139	356×427	2540×3052	до 4,5	РАП-300-5
DRTECH FDXD 810	129	264×198	2008×1496	до 5	РАП-300-5
Samsung XMARU 1210p	127	264×325	2040×2560	до 10*	РАП-300-5
GE DXR250V	200	410×410	2048×2048	0,13...30*	РАП-300-5

* Возможно использование накопления (усреднения) кадров.

Первоначальное напряжение на рентгеновской трубке выбиралось согласно рекомендациям ISO 17636-2, затем изменялось в большую и меньшую сторону в общем диапазоне порядка 50 кВ.

В работе описывается методика экспериментов, приводятся результаты и выводы о применимости указанных устройств для радиографического контроля согласно ISO 17636-2:2013.

Литература

1. **ISO 17636-2:2013(E)**. Non-destructive Testing of Welds – Radiographic Testing. Part 2: X- and Gamma-ray Techniques with Digital Detectors.
2. **ISO 19232-1:2013**. Non-Destructive Testing – Image Quality of Radiographs. Part 1: Determination of the Image Quality Value Using Wire-type Image Quality Indicators.
3. **ISO 19232-5:2013**. Non-destructive Testing – Image Quality of Radiographs. Part 5: Determination of the Image Unsharpness Value Using Duplex Wire-type Image Quality Indicators.

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ТОМОГРАФИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Батрагин А.В., Капранов Б.И., Чахлов С.В.
*Национальный исследовательский
Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

Введение

За последние два десятилетия рентгеновская томография прочно заняла свое место в различных сферах науки и техники, не связанных напрямую со своей традиционной областью – медициной. Это стало возможным благодаря совершенствованию рентгеновских источников, детекторов излучения и стремительному развитию вычислительной техники и программного обеспечения, без которых компьютерная томография немыслима. Сейчас на рынке доступны источники излучения с размером фокального пятна порядка нескольких микрометров при максимальном ускоряющем напряжении до 225 кВ, а также более мощные устройства – до 450 кВ с фокальным пятном менее 100 мкм [1]. Детекторы излучения также интенсивно совершенствуются: одновременно повышается эффективность регистрации гамма-квантов, уменьшается размер пикселя и увеличивается число пикселей в одном устройстве. Все это позволяет создавать томографические системы высокого разрешения для исследования достаточно плотных материалов – металлов и керамик, а также крупных изделий, например, двигателей внутреннего сгорания.

В настоящее время на рынке представлено большое число томографических сканеров, которые различаются мощностью источников, разрешающей способностью и габаритами объектов исследования. Однако целесообразность создания собственных томографических установок есть. Во-первых, фирменные томографы – достаточно дорогие устройства. Во-вторых, покупка готовой установки не гарантирует моментального получения хороших результатов исследования в силу сложности самого метода и в силу специфики прилагаемого программного обеспечения. Как правило, требуется предварительная подготовка персонала, проводимая производителем или поставщиком оборудования. В-третьих, устройства поставляются «как есть», что затрудняет их модификацию под специфические задачи и сужает область экспериментирования на приобретенной установке. И в заключение можно добавить, что принципы получения информации неизменны как в коммерческих, так и в экспериментальных установках, поэтому исследование возможностей самого метода, как инструмента неразрушающего контроля, мало чем отличается.

Существующий и разрабатываемый томографы

В рамках Международной лаборатории неразрушающего контроля (Tomsk Open Laboratory for Material Inspection, TOLMI) Томского политехнического университета уже разработана настольная томографическая сис-

тема TOLMI-150-10 [2], которая была использована для проведения исследований внутренней структуры каменных углей [3] и определения толщины карбидокремниевых покрытий [4]. Опыт, полученный при создании установки, позволил перейти к разработке более сложного и прецизионного устройства. Сравнение фактических характеристик изготовленного и ожидаемых характеристик разрабатываемого томографа приведено в табл. 1.

Томографическая система – это система визуализации, задача которой наиболее точно воспроизвести пространственное распределение коэффициента ослабления рентгеновского излучения. Таким образом, производительность томографической системы – это точность воспроизведения внутренней структуры исследуемых объектов. Существуют методики количественной оценки производительности томографических установок, изложенные в национальных и международных стандартах [5]. Интегральной характеристикой, устанавливающей связь между пространственным разрешением и контрастной чувствительностью, является функция передачи модуляции (ФПМ). В данной работе изложена методика измерения ФПМ, выполненная для томографа TOLMI-150-10, и приведены результаты.

Томографические системы, как средства измерения, имеют инструментальные и методические погрешности. Первые связаны с рядом факторов: дрейфом фокального пятна рентгеновской трубки, шумом и нелинейностью детекторов, ошибками позиционирования объекта с помощью манипуляторов и рядом других факторов. Методические погрешности вызваны, главным образом, несовершенством математических алгоритмов реконструкции, в которых проводится упрощение физических процессов взаимодействия излучения с веществом для повышения скорости расчетов.

1. Ключевые характеристики экспериментальных томографов

Характеристика	TOLMI-150-10	Разрабатываемый томограф
Напряжение на трубке, кВ	40...150	20...160
Ток анода, мА	до 0,1	до 1,0
Размер фокусного пятна, мкм	~ 30	~ 1
Шаг пикселей детектора, мкм	96	127
Размер детектора, мм×мм	98×96	242×193
Проекционное увеличение	×1,3...10	×1,3...150
Максимальный диаметр объекта, мм	75	200
Минимальный размер вокселя после реконструкции, мкм	10	1

К настоящему времени оценка погрешностей измерений для томографа TOLMI-150-10 не завершена в полном объеме. В работе приведены результаты оценки вклада дрейфа фокального пятна и точности фокусировки электронного луча в рентгеновской трубке в общую инструментальную погрешность. Кроме того, в работе делается критический анализ проведенной работы и описывается план дальнейших действий, результаты которых позволят оценить качество системы томографической визуализации согласно действующими стандартами.

Литература

1. **Вайнберг И.А., Вайнберг Э.И.** История, состояние и перспективы промышленной рентгеновской компьютерной томографии. В мире НК. 2013. № 3(61). С. 5 – 12.
2. **Design of the X-ray Micro-CT Scanner TOLMI-150-10 and its Perspective Application in Non-Destructive Evaluation** / A.V. Batranin, S.V. Chakhlov, D.V. Grinev, B.I. Kapranov, V.A. Klimenov // *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 379. P. 3 – 10.
3. **Исследование** каменных углей с использованием рентгеновской томографии / С.П. Ворошилов, В.А. Клименов, Б.И. Капранов и др. // *Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2013. Т. 1.2. С. 5 – 11.
4. **Томографический** метод эталонирования образцов толщины карбидокремниевого покрытия / А.В. Батралин, Д.С. Белкин, Б.И. Капранов и др. // *Механика и процессы управления: материалы XXXXII Всероссийского симпозиума, Миасс, 18 – 20 дек. 2012. СПб.: РАН, 2012. Т. 1. С. 38 – 46.*
5. **ISO 15708-1:2002.** Non-destructive testing – Radiation Methods – Computed tomography. Part 1: Principles.

ИСТОЧНИК ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ С ФОТОКАТОДОМ

Бессонов В.Б.¹, Потрахов Е.Н.², Потрахов Н.Н.¹

¹*Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина)*
²*ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед» (Технопарк СПбГЭТУ)*

Введение

Традиционно источники рентгеновского излучения, предназначенные для исследования быстропротекающих процессов, конструировались на основе импульсных рентгеновских трубок с «холодным» – автоэмиссион-

ным или взрывным катодами [1]. Генерируемые с их помощью короткие импульсы рентгеновского излучения позволяли исключить динамическую нерезкость изображения при просвечивании подвижных объектов.

Наибольшее распространение в конце прошлого века получили импульсные рентгеновские аппараты на двухэлектродных трубках серии ИМА с взрывоэмиссионным катодом. Аппараты генерировали импульсы рентгеновского излучения с энергией от 100 до 500 кэВ и выше, длительностью несколько десятков нс и максимальной частотой следования несколько десятков Гц. Средняя мощность их мощность составляла от нескольких десятков до нескольких сотен ватт [2].

Однако область применения таких аппаратов ограничивалась рядом существенных недостатков конструкции. Во-первых, отсутствием возможности регулировки амплитуды напряжения и тока в импульсе, а также – длительности и формы импульса. Во-вторых, отсутствием возможности синхронизации работы с различными фазами исследуемого процесса. Этот недостаток частично устранялся использованием управляемых разрядников. С этой целью электрический сигнал от специального модулятора подавался на управляющий электрод разрядника. Однако принцип действия такого разрядника обуславливал ненормированную задержку импульса ускоряющего напряжения на трубке относительно импульса синхронизации. Величина задержки могла достигать длительности самого импульса излучения [3].

Материалы и методы

С целью улучшения частотно-временных характеристик управляемого импульсного источника излучения используется оригинальная рентгеновская трубка с фотокатодом [4].

Внешний вид рентгеновской трубки с фотокатодом представлен на рис. 1. Структурная схема источника на основе этой трубки показана на рис. 2 [5]. В состав источника помимо рентгеновской трубки 1 входят: высоковольтный источник постоянного напряжения (ВИП) 2 и генератор управляющего сигнала на основе излучающего светодиода – оптический модулятор (М) 3. Рентгеновская трубка 1 содержит фотокатод 4, управляющий электрод 5 в виде диодной секции и анод 6. Питание диодов осуществляется от источника напряжения (ИП) 7. В вакуумном баллоне трубки предусмотрено входное окно 8 для оптического излучения.

Источник рентгеновского излучения работает следующим образом. Оптический модулятор 3 генерирует поток 9 импульсов оптического излучения, который через входное окно 8 рентгеновской трубки попадает на фотокатод 4. Синхронно импульсам оптического излучения происходит эмиссия фотоэлектронов, количество которых посредством диодов управляющего электрода 5, питаемого от маломощного источника напряжения 6, увеличивается на несколько порядков.



Рис. 1. Внешний вид рентгеновской трубки с фотокатодом на напряжение 100 кВ

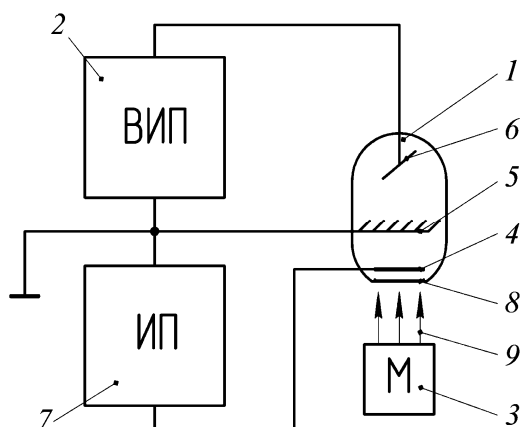


Рис. 2. Структурная схема управляемого импульсного источника излучения на основе рентгеновской трубки с фотокатодом

На выходе из диодной секции поток электронов ускоряется полем анода, на который подано напряжение положительной относительно катода полярности от ВИП 2. Ускоренные электроны направляются на мишень анода и генерируют импульсы рентгеновского излучения. Для регистрации импульсов излучения используется счетчик рентгеновских квантов на основе кристалл-сцинтиллятора NaI и ФЭУ – 176 [6].

Результаты и обсуждение

На рис. 3 представлены эпюры сигнала на входе оптического модулятора (верхняя кривая) и на выходе счетчика излучения (нижняя кривая), полученные при разных длительности и частоте следования управляющих импульсов оптического излучения.

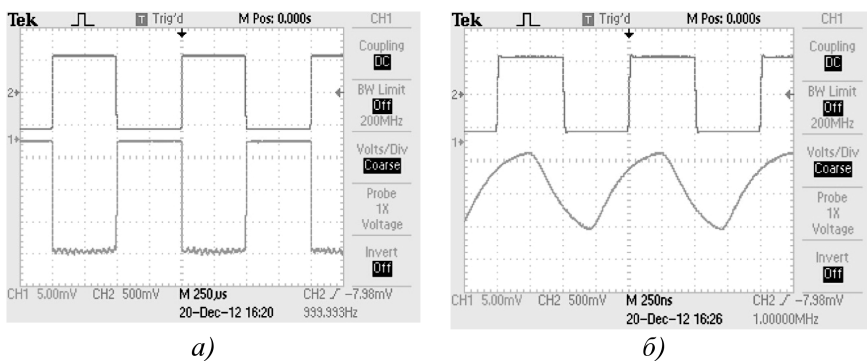


Рис. 3. Эпюры электрических сигналов на входе оптического модулятора (верхняя кривая) и на выходе сцинтилляционного счетчика (нижняя кривая):
а – часто следования входных импульсов $f = 1$ кГц; *б* – $f = 1$ МГц

Уверенная корреляция выходных импульсов рентгеновского излучения с входными импульсами оптического излучения сохраняется вплоть до частоты следования 1 МГц.

Искажения формы выходных импульсов с увеличением частоты следования входных импульсов обусловлены временем нарастания интенсивности излучения светодиода, а также временем послесвечения кристалл-сцинтиллятора счетчика.

Литература

1. **Иванов С.А.** Рентгеновские трубки для научных исследований для промышленного контроля и технологии // *Обзоры по электронной технике*. Сер. 4. 1982. Вып. 1(867). 49 с.
2. **Месяц Г.А., Иванов С.А., Комяк Н.И., Пеликс Е.А.** Мощные наносекундные импульсы рентгеновского излучения. М.: Энергоатомиздат 1983. 168 с.
3. **Комяк Н.И., Иванов С.А., Пеликс Е.А.** Импульсные рентгеновские аппараты. М.: ЦНИИТЭИ Приборостроение. 1980. 45 с.
4. **Пат. на полезн. модель МПК H01G35/00.** Катодный узел электровакуумного прибора / Алымов О.В., Левко Г.В. Зарег. 20.12.12.
5. **Полож. реш. на полезн. модель по заявке 2013137632/(056731).** Управляемый источник рентгеновского излучения / Потрахов Н.Н., Потрахов Е.Н., Бессонов В.Б., Жамова К.К., Шишов Д.И. Заявл. 09.08.2013
6. **Рентгенотехника:** Справочник. В. 2-х кн. / Под. ред. В.В. Ключева. М.: Машиностроение, 1980. Кн. 2. 368 с.

ТЕХНОЛОГИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА КОНСЕРВИРОВАННОЙ ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ

Бессонов В.Б.¹, Герасимов В.А.¹, Потрахов Е.Н.¹, Селиванов Л.М.¹
Архипов М.В.², Великанов Л.П.², Желудков А.В.²

¹*Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина) «ЛЭТИ»,*
²*ГНУ Агрофизический НИИ Россельхозакадемии*

Введение

Одной из ведущих отраслей пищевой промышленности является производство консервированной продукции (мясной, рыбной, молочной, овощной и т.д.). Данный вид продукции наиболее подходит для длительного хранения пищевых продуктов в пригодном для потребления виде. Очевидно, что качество консервированной продукции определяется не только качеством исходного сырья, но и в не меньшей степени наличием и эффективностью функционирования системы контроля и управлением качеством при ее производстве.

Основные факторы риска для здоровья людей обусловлены биохимическим (например, микробный бомбаж) и физическим (например, наличие инородных включений – металлической стружки, песка и т.д.) воздействиями на консервированную продукцию.

Наиболее часто встречаемый дефект – микробный бомбаж, характеризуется вздутием доннышка консервной банки по причине накопления внутри нее газов, образующихся в результате жизнедеятельности микроорганизмов. Микробный бомбаж указывает на то, что содержимое банки утратило стерильность, например, вследствие некачественной герметизации банки. В результате чего в банку вместе с наружным воздухом проникли микроорганизмы, что вызвало неизбежную порчу содержимого в ней продукта.

Материалы и методы

Герметичность банки обеспечивается при ее закатке – одной из наиболее важных и требующих повышенного внимания технологических операций в процессе производства консервов. При выполнении операции закатки формируется, так называемый, закаточный шов – двойное фальцевое (пятислойное) соединение, образованное совместным деформированием фланцев корпуса банки и крышки. Банки закатывают на специальных закаточных машинах. Вследствие неправильной первичной настройки параметров закаточной машины или постепенного их изменения в процессе ее эксплуатации конфигурация

и геометрические размеры шва могут выйти за установленные приделы. По этой причине контроль параметра шва производится регулярно. Периодичность контроля в соответствии с требованиями СанПиН 2.3.4.050–96 должна составлять для каждой головки закаточной машины один раз за 30 мин для пустых банок и один раз за два часа для банок с продуктом.

Традиционно качество закаточного шва при производстве пищевых консервов в металлической таре контролируется разрушающим способом, при котором участок шва вырезается циркульной минипилой и анализируется визуально с помощью лупы или специального устройства – профиля проектора (рис. 1). В процессе анализа геометрические размеры элементов шва, в первую очередь, величину перекрытия – сравнивают с нормативными размерами, что позволяет оценить его герметичность [1].

Описанный способ неразрушающего контроля обладает рядом недостатков:

- безвозвратные потери банок и содержимого продукта;
- низкая достоверность результатов контроля, обусловленная деформациями элементов шва в процессе его вырезания;
- влияние человеческого фактора при визуальном определении размеров элемента шва;
- контролируется участок шва длиной всего 2...3 % от его общей протяженности;
- процесс вырезания участка шва трудоемок и длителен.

Результаты и обсуждение

Для устранения недостатков, описанного разрушающего способа контроля, специалистами ООО «РДС-Лаб» предлагается неразрушающий – «рентгеновский» способ контроля [2], при котором участок шва просвечивается с помощью рентгеновского аппарата с фокусным пятном малого размера, а его рентгеновское изображение регистрируется с помощью цифровой системы визуализации на основе рентгеночувствительной фотодиодной линейки. Для получения изображения шва по всей его длине банка поворачивается вокруг своей оси на один полный оборот. Полученное цифровое изображение шва содержит информацию о реальных размерах всех элементов шва на всем его протяжении.

С помощью специальной компьютерной программы параметры контролируемого шва сравниваются с нормативными значениями. Программа позволяет оценить характер возможных изменений размеров элемента шва, и «выдать» соответствующие указания на корректировку настроек закаточной машины, а в случае недопустимого отклонения измеренных значений

от заданных – остановить работу машины. Одновременно с измерениями составляется протокол контроля качества шва с выводом его результатов на монитор персонального компьютера (ПК).

Аналогичным способом контролируется качество содержимого в банке продукта. С этой целью банка поступательно (без вращения) перемещается в промежутке между источником рентгеновского излучения и приемником рентгеновского изображения.

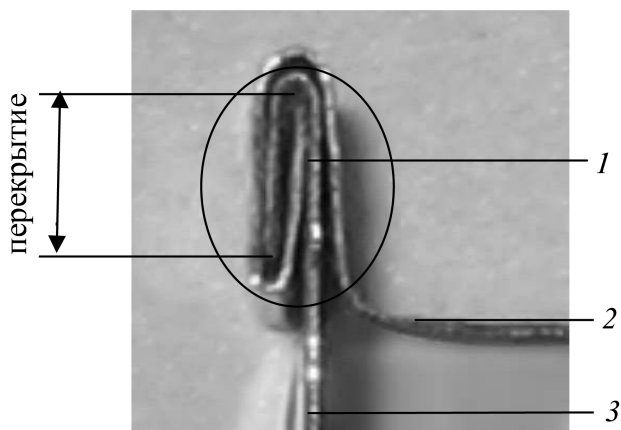


Рис. 1. Разрез закаточного шва консервной банки:
1 – шов; 2 – крышка; 3 – боковая стенка

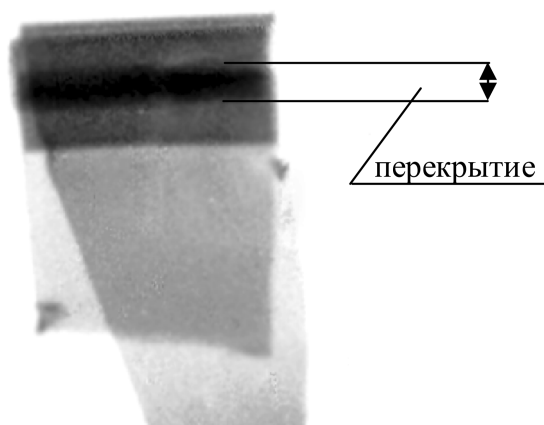
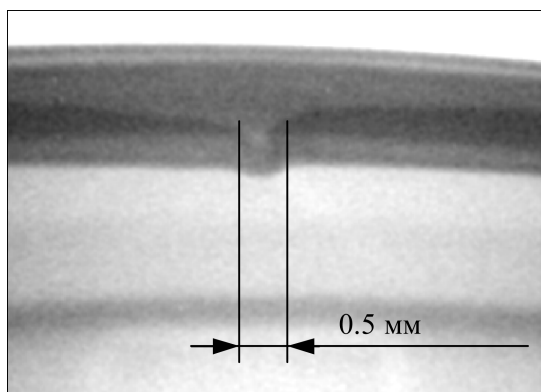


Рис. 2. Рентгеновский снимок участка закаточного шва



**Рис. 3. Дефектный участок шва.
Выявленный дефект – отсутствие перекрытия**

Специальная компьютерная программа позволяет получить и вывести изображение на экран монитора ПК. При этом автоматически диагностируется наличие инородных включений, а также оценивается соотношение твердой и жидкой фракций продукта (например, кости, мясо, бульон, томатная паста и т.д.). Одновременно, как и при контроле качества шва, составляется протокол качества содержимого продукта.

Литературы

1. **ОСТ 15-400-97.** Стандарт отрасли. Банки металлические для рыбных консервов и пресервов. Технические условия.
2. **Пат. РФ на изобретение 2175126.** Способ неразрушающего контроля кольцевого соединения / Потрахов Н.Н., Мухина Л.Б., Корчинский В.Е. Зарег. от 20.10.01.
3. **Пат. РФ на полезн. модель 65649.** Рентгенодефектоскопическая установка для контроля качества закаточного шва и содержимого закаточных банок / Нино В.П., Ратников В.И., Потрахов Н.Н. Зарег. 08.12.06.
4. **Пат. РФ на полезн. модель 114156.** Рентгенодефектоскопическая установка для автоматизированного контроля качества закаточного шва и содержимого движущихся на транспортере консервных банок / Нино В.П., Ратников В.И., Потрахов Н.Н., Потрахов Е.Н., Грязнов А.Ю., Купец Г.В. Зарег. 07.06.11.
5. **Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ 2011614448.** Программа расшифровки обратных лауэграмм ГЦК-монокристаллов для определения кристаллографической ориентации образцов (КГО-анализ) / Осес Р.Х., Лифшиц В.А., Потрахов Н.Н., Потрахов Е.Н. Зарег. 6.06.2011.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ

Богомолов Е.Н.¹, Сыряжкин В.И.², Сунцов С.Б.²

¹Томский политехнический университет,

²Томский государственный университет, Томск, Россия

Современное состояние диагностического оборудования не позволяет обеспечивать автоматическую диагностику конструкций, систем ответственного оборудования и изделий из наноматериалов; также невозможно предсказать ресурс его работы. Нет возможности проводить с высокой точностью автоматизированные бесконтактные исследования оборудования, расположенного в труднодоступных местах (высоко над землей или под землей). Указанные недостатки обусловлены тем, что, во-первых, отсутствуют комплексные методы и средства, обеспечивающие обследование оборудования с высокой точностью; во-вторых, не используются методы и алгоритмы, обрабатывающие и сообщающие достоверную информацию о состоянии объекта исследования и осуществляющие автоматизированную диагностику, адаптирующиеся к изменяющимся условиям работы и объектам диагностики.

Традиционная оптическая или электронная микроскопия предоставляют двумерные изображения поверхности образца либо его тонких срезов. Однако, в большинстве случаев, заключение о реальной трехмерной структуре образца не может быть сделано на основе двумерных его изображений. Одним из способов получения объемного изображения структуры образца является рассеяние его на очень тонкие слои, которые могут быть исследованы оптическим микроскопом, и конструирование объемной модели на основе набора плоских картинок. Однако эта методика не только чересчур сложна, но также не очень надежна, поскольку структура самого объекта может быть изменена в ходе подготовки и расстояния между сечениями, как правило, слишком велики, чтобы полностью избежать потери информации об объемном строении образца.

Рентгеновская система генерирует плоское теневое изображение полной внутренней объемной структуры образца, но в отдельной теневой проекции глубинного распределения структур образца полностью смешиваются. Только рентгеновская томография позволяет визуализировать и измерить пространственные структуры образцов без их химической и механической обработки. Как правило, разрешение медицинских аппаратов лежит в пределах 1...2,5 мм, что соответствует размеру объемного элемента в 1...10 мм³. Применение компьютеризированной рентгеновской микроскопии и микротомографии позволяет улучшить разрешение по объему на 7–8 порядков. На сегодняшний день становится возможным достичь разрешения в 5 мкм, что соответствует размеру объемного элемента порядка 10⁻⁷ мм³. Как и в случае медицинских рентгеновских аппаратов, внутренняя структура образцов может быть реконструирована и исследована без разрушения образца.

Любое рентгеновское теневое изображение является плоской проекцией трехмерного объекта. В наиболее простом случае мы можем описать его, как изображение, полученное в параллельных рентгеновских лучах. В данном приближении, каждая точка теневого изображения содержит суммарную информацию по адсорбции конкретного рентгеновского пучка на всем объеме трехмерного объекта. Для параллельной геометрии рентгеновских пучков реконструкция объемного изображения образца из двухмерной теневой проекции реализуется с помощью реконструкций серии двумерных срезов образца вдоль одномерных теневых линий.

Возможность такого рода реконструкций демонстрируется на простом примере: рассмотрим объект с единственной точкой с высокой адсорбцией в неизвестном месте. В одномерной теневой линии будет наблюдаться уменьшение интенсивности вследствие ее поглощения на адсорбирующем объекте. Можно смоделировать в компьютерной памяти пустой ряд пикселей (элементов изображения) соответствующий предполагаемому смещению объекта. Естественно, следует удостовериться, что все части реконструируемого объекта будут находиться в поле зрения. Поскольку известны координаты теней от поглощающих областей объекта, можно выделить в реконструируемой области в памяти компьютера все возможные положения поглощающих областей внутри объекта в виде линий. Далее следует вращать объект и повторять операцию. В каждом новом положении объекта будем добавлять к реконструируемой области линии возможных положений объекта в соответствии с положением его теневых проекций. Эта операция называется обратным проецированием. После нескольких оборотов можно локализовать положение поглощающей области внутри объема реконструкции. С увеличением числа теневых проекций с различных направлений, эта локализация становится все более четкой.

В случае реконструкции на основании бесконечного числа проекций получается изображение с хорошей четкостью определения позиции области поглощения внутри исследуемого объекта. В то же время точечное изображение будет сопровождаться размытой областью, поскольку оно было получено в ходе наложения линий со всеми возможными отклонениями.

Теперь, поскольку уже известно, что изображение образовано точечным объектом, можно провести предварительную коррекцию начальной информации в линиях сорбции, чтобы сделать конечное изображение наиболее приближенное к реальному объекту. Этот алгоритм дает не только изображения сечений отдельных точечных структур, но и позволяет исследовать реальные объекты.

Каждый материальный объект может быть представлен как большое количество отдельных элементарных поглощающих объемов и линейная адсорбция в каждом рентгеновском пучке соответствует суммарной адсорбции на всех поглощающих структурах встреченных пучком.

Таким образом, двумерные сечения объекта могут быть восстановлены из одномерных теневых линий с различных ракурсов. Однако большин-

ство рентгеновских излучателей не способны генерировать параллельные пучки излучения. В реальности используются точечные источники, производящие конические пучки рентгеновского излучения. Для томографии решением этой проблемы явилось перераспределение теневой информации.

Литература

1. **Полифункциональные** неорганические материалы / В.И. Верещагин, В.В. Козик, В.И. Сырякин и др. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. 192 с.
2. **Грановский В.А., Сирая Т.Н.** Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. 288 с.
3. **Грег С., Синг К.** Адсорбция, удельная поверхность, пористость. М.: Мир, 1984. 306 с.
4. **Претт У.** Цифровая обработка изображений / Пер с англ. М.: Мир, 1982. Кн. 2. 480 с.
5. **Системы** технического зрения: Справочник / В.И. Сырякин, В.С. Титов, Ю.Г. Якушенков и др. / Под ред. В.И. Сырякина и В.С. Титова. Томск: МГП «РАСКО», 1992. 367 с.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ МЕТОДОВ РЕГИСТРАЦИИ ОБРАТНО РАССЕЯННОГО И ТРАНСМИССИОННЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ПРИ КОНТРОЛЕ НИЗКОПЛОТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ РАЗЛИЧНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Буклей А.А., Блохин Е.О., Емельянов М.Е.,
Паршин И.А., Федоровский Е.В.

ЗАО «НИИИИ МНПО «Спектр», ООО «Флэш электроникс», ФСО России

В работе приводятся экспериментальные результаты применения различных цифровых панелей фирмы «Varian» и рентгеновского аппарата ХС-100А (ООО «Флэш электроникс») при контроле алюминиевых, титановых отливок, графитосодержащих изделий, а также применения рентгеновского сканера «Феникс» при контроле сплошности и изменений в структуре готовых конструкций.

Так в работе отмечается, что применение медицинских панелей типа Raхscan 4336 улучшает качество контроля легких (низкоплотных) конструкций по сравнению с панелью, предназначенной для неразрушающего контроля, типа Raхscan 4030 Е в определенном диапазоне толщин.

Обсуждаются особенности применения рентгеновского метода при регистрации обратно рассеянного излучения от сотовой конструкции.

РЕНТГЕНОВСКАЯ ЭКСПОНОМЕТРИЯ В ДИАГНОСТИКЕ

Владимиров Л.В.^{1,2}, Козлов А.А.¹
¹ЗАО НИИИИИ МНПО «Спектр», ²РМПАО Кафедра
радиационной гигиены

Разработка аппаратуры для рентгеновской экспонетрии в НИИИИИИ началась в 70-х гг. прошлого века по причине необходимости автоматической отработки экспозиции при рентгеновских снимках, как в промышленных рентгеновских аппаратах, так и в медицинских.

Основными узлами в системах автоматической экспозиции являются приемники рентгеновского излучения – ионизационные камеры или детекторы другого типа, предварительные усилители сигнала с приемников рентгеновского излучения и узлы обработки этого сигнала – экспонетры, целью которых является выдача сигнала на отключение рентгеновского излучения при достижении необходимой дозы экспозиции.

Системы автоматической экспозиции, разрабатываемые в НИИИИИИИ, в основном, были ориентированы на применение в медицинской технике, для различного типа рентгеновских аппаратов. В качестве приемника рентгеновского излучения требовался детектор, максимально прозрачный для рентгеновского излучения. Таким детектором, размещаемым перед кассетой с рентгенопленкой, могла быть только ионизационная камера с воздушной средой между электродами. При этом электроды не должны были быть видны на рентгеновских снимках.

Схема подключения системы автоматической экспозиции представлена на рис. 1.

В настоящее время экспонетр выпускается не как отдельный прибор, подключаемый к рентгеновскому аппарату, а в виде узла, встроенного в питающее устройство рентгеновского аппарата.

В ионизационных камерах, разрабатываемых в НИИИИИИИ, постоянно улучшались технические характеристики по таким параметрам, как толщина и рентгенопрозрачность. Так, толщина камер уменьшилась в 3 раза – с 15 до 5 мм, а рентгенопрозрачность, выраженная в алюминиевом эквиваленте улучшилась в 2 раза – с 1,4 до 0,7 мм.

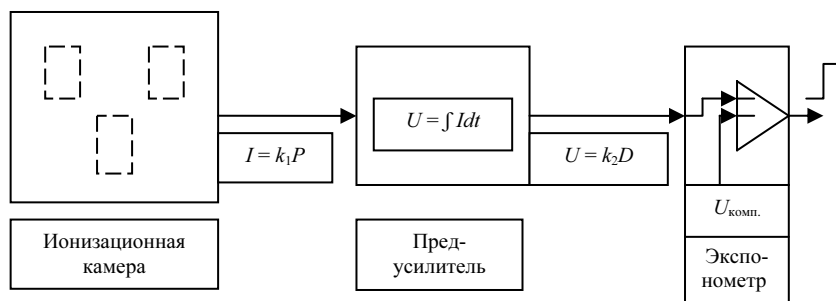


Рис. 1. Схема подключения системы автоматической экспозиции

Схемотехника предусилителей, разработанных в НИИИН, имеет существенное преимущество перед зарубежными аналогами по динамическому диапазону мощности дозы рентгеновского излучения за счет прямого интегрирования тока с измерительных полей ионизационной камеры. В настоящее время этот диапазон достигает 10^6 . Основные технические характеристики ионизационных камер и предусилителей, выпускаемых в настоящее время в НИИИН показаны в таблице.

Таблица

Обозначение/ Толщина, мм	Средняя чувствительность измерительных полей, А · с / Гр	Диапазон выходного сигнала предусилителя, В	Инерционность ионизационной камеры, мс	Алюминиевый эквивалент, мм
161-01 / 6	$7 \cdot 10^{-5}$	$\pm (0,05 \dots 10)$	0,5	1,0
154-04 / 6				
161-02 / 5	$6 \cdot 10^{-5}$		0,1	0,7
154-05 / 5				

ОСНОВАННЫЙ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ АЛГОРИТМ ДЛЯ СВОБОДНОЙ ОТ АРТЕФАКТОВ РЕКОНСТРУКЦИИ В МАЛОРАКУРСНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

Власов В.В., Коновалов А.Б., Углов А.С.
ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики
им. академика Е.И. Забабахина» (РФЯЦ-ВНИИТФ), г. Снежинск, Россия

Введение

В работе представлен новый итерационный алгебраический алгоритм для реконструкции томографических изображений без артефактов в условиях, когда регистрируется очень ограниченное число проекций (менее десяти). Алгоритм использует априорную информацию о дискретных значениях реконструируемой функции объекта и базируется на известном мультипликативном алгебраическом алгоритме MART [1], модифицированном нами для случая сильной недостаточности данных [2, 3]. Основная идея алгоритма, названного нами MART-AP, состоит в том, что организуется цикл «внешних» итераций, на каждой из которых работает MART с его «внутренними» итерациями. Но при этом поправки в приближение решения вносятся с учетом так называемой «маски», которая содержит

априорное знание о дискретных значениях функции объекта, синтезируется посредством пороговой сегментации и подстраивается по результатам выполнения каждой «внешней» итерации.

Описание алгоритма

Пусть искомая функция объекта принимает внутри j -й ячейки области реконструкции постоянное значение f_j . Тогда $\mathbf{f} = \{f_j\}_1^J$ – вектор дискретных значений функции объекта. Пусть p_i – проекция, регистрируемая для i -й связи источник-приемник. Соответственно $\mathbf{p} = \{p_i\}_1^I$ – вектор проекционных данных. В случае дискретной томографии [4] кроме результатов измерений $\{p_i\}_1^I$ нам дополнительно известен набор дискретных значений функции объекта $\{f^k\}_1^K$, таких, что каждое k -ое значение f^k должна априори принимать целая группа ячеек, объединенных в k -й кластер. В предположении рентгеновской монохроматической томографии каждое значение массива $\{f^k\}_1^K$ однозначно соответствует одному из K материалов, из которых состоит объект. Тогда задача реконструкции сводится к поиску такого распределения значений $\{f^k\}_1^K$ по пространству области реконструкции, которое наилучшим образом удовлетворяет системе линейных алгебраических уравнений $\mathbf{p} = \mathbf{W}\mathbf{f}$, где $\mathbf{W} = W_{ij}$ – матрица весовых коэффициентов. Введем преобразование $\mathbf{M}: \{f^k\}_1^K \rightarrow \{N^l\}_0^K$, где $\{N^l\}_0^K$ – множество натуральных чисел в интервале $(0, K)$. Результатом преобразования \mathbf{M} является маска $\mathbf{M} = \{M_j\}_1^J$, которая также как и искомое изображение \mathbf{f} описывается набором дискретных значений, распределенным по J ячейкам. На каждой текущей «внешней» $(s + 1)$ -й итерации ячейки маски принимают значения из множества $\{N^l\}_0^K$. Причем в интервале $(1, K)$ эти значения соответствуют индексам материалов объекта, которые удалось оценить на предыдущей s -й итерации. Значение 0 показывает, что данным ячейкам области реконструкции пока не удалось поставить в соответствие какой-либо из K индексов. На 1-й итерации все ячейки маски имеют нулевые значения. Соответственно приближение решения будет иметь значения, которые еще не удалось ассоциировать с априорно заданными $\{f^k\}_1^K$. В процессе следующих итераций маска заполняется ненулевыми значениями, а текущее приближение решения – приобретает значения все более близкие к априорно заданным. Итерационную схему алгоритма можно представить в виде последовательности следующих шагов.

Шаг 1. Задать начальную оценку функции объекта $\mathbf{f}^{(0)}$ и маски $\mathbf{M}^{(0)}$.

Шаг 2. Для $s = 0, 1, 2, \dots$ вычислить приближение $\mathbf{f}^{(s+1)}$ по алгоритму MART с учетом маски $\mathbf{M}^{(s)}$.

Шаг 3. Сгладить результат реконструкции $\mathbf{f}^{(s+1)}$ низкочастотным фильтром.

Шаг 4. Вычислить значения маски $\mathbf{M}^{(s+1)}$.

Шаг 5. Если $\mathbf{M}^{(s+1)} \neq \mathbf{M}^{(s)}$, то перейти на шаг 2, иначе – на шаг 6.

Шаг 6. Окончание алгоритма.

Схему введения поправок на очередной «внутренней» $(q + 1)$ -й итерации можно описать следующими формулами

$$f_j^{(q+1)} = f_j^{(q)} \left[p_i / \sum_{j=1}^J W_{ij} f_j^{(q)} \right]^{\lambda W_{ij} / \sum_{n=1}^{J^k} W_{in}},$$

$$W_{ij} = \begin{cases} W_{ij}, & \text{если } M_j = 0; \\ \sum_{n=1}^{J^k} W_{in}, & \text{если } M_j \neq 0 \text{ и } M_j = M_n, \end{cases}$$

$$f_n^{(q+1)} = \left\{ f_j^{(q+1)} \mid M_n = M_j \right\}_1^K,$$

где λ – параметр регуляризации; $\sum_{n=1}^{J^k} W_{in}$ – сумма весов ячеек k -го кластера вдоль i -й траектории, n – индекс ячейки k -го кластера и J^k – число ячеек k -го кластера.

Результаты и анализ вычислительного эксперимента

Для исследования эффективности предложенного алгоритма нами поставлен численный эксперимент, в рамках которого восстановлена 2D модель, представляющая собой железное кольцо с внешним диаметром 7 см и внутренним диаметром 4,6 см. Кольцо содержит два отверстия диаметром 0,8 см каждое. В качестве априорных дискретных значений использовались $f^1 = 0,0001 \text{ см}^{-1}$ и $f^2 = 0,42 \text{ см}^{-1}$. Первое из них характеризует коэффициент ослабления воздуха, а второе – коэффициент ослабления железа. При моделировании проекций и реконструкции изображений используется веерная геометрия со следующими параметрами: девять проекций на сегменте 150° , коэффициент геометрического увеличения 1,5, источники точечные, а система регистрации – линейка из 240 приемников с апертурой 0,45 мм каждый. Преобразование \mathbf{M} записывается в виде $\{f^1, f^2\} \rightarrow \{0, 1, 2\}$, а маска – в виде

$$M_j^{(s+1)} = \begin{cases} 2, & \text{если } f_j^{(s+1)} \geq f^2(1-t); \\ 1, & \text{если } f_j^{(s+1)} \leq f^2 t; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где $t \in (0, 1)$ – уровень отклонения от априорных значений f^k . Реконструкция выполняется на сетку 200×200 . На рис. 1 представлены маски и соответствующие им приближения функции объекта для различных итераций.

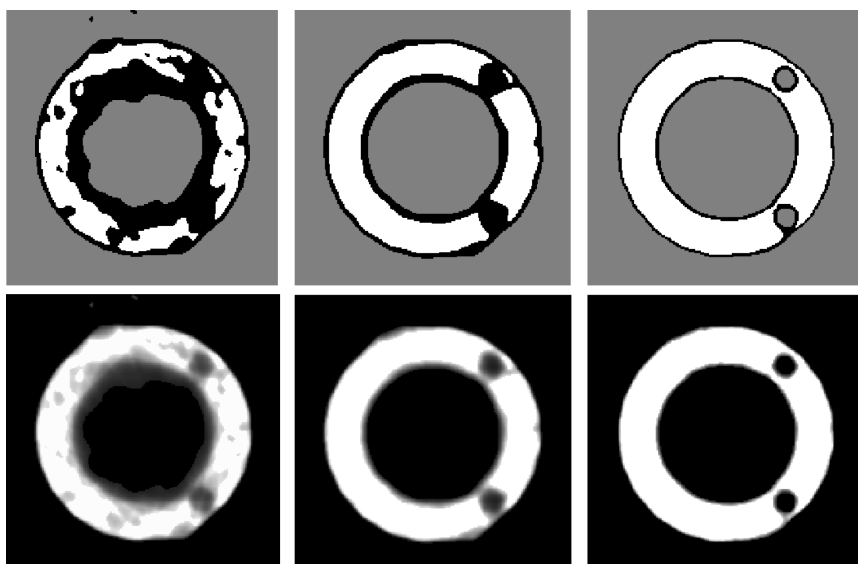


Рис. 1. Маски (верхняя строка изображений) и результаты реконструкции (нижняя строка изображений) для 2-й, 51-й и 101-й итераций

Из рисунка 1 видно, что предложенный алгоритм позволяет получать изображения без артефактов, свойственных малоракурсной томографии.

Литература

1. **Gordon R., Bender R., Herman G.T.** Algebraic Reconstruction Techniques (ART) for Three-dimensional Electron Microscopy and X-ray Photography // *J. Theor. Biol.* 1970. V. 29. P. 471 – 481.
2. **Kononov A.B., Kiselev A.N., Vlasov V.V.** Spatial Resolution in Few-view Computed Tomography Using Algebraic Reconstruction Techniques // *Pattern Recognition and Image Analysis.* 2006. V. 16. P. 249 – 255.
3. **Контроль** откольных и сдвиговых разрушений в обжатой взрывом сферической железной оболочке методом малоракурсной гамма-томографии / А.Б. Коновалов, Д.В. Могиленских, Е.А. Козлов и др. // *Дефектоскопия.* 2008. № 1. С. 19 – 31.
4. **Herman G.T., Kuba A., eds.** *Discrete Tomography: Foundations, Algorithms and Applications*, Boston: Birkhauser, 1999.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО АТОМНОГО НОМЕРА НА ОСНОВЕ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ

Горшков В.А.

Идентификация малоразмерных включений, отличающихся химическим составом (в большинстве случаев, эффективным атомным номером), в объектах средствами радиационной рентгеноскопии сопряжено с рядом трудностей, связанных с соизмеримостью распределений произведения плотности на толщину в области этих включений с остальными областями объекта.

Одним из выходов из данного положения является получение 3-Д распределения эффективного атомного номера.

Существует две методологические предпосылки к решению данной задачи:

1. Связь отношения массовых коэффициентов поглощения комптоновского рассеяния с атомным номером вещества.

2. Связь отношения массовых коэффициентов поглощения для двух различных энергий исходного излучения с атомным номером вещества.

Это определяет наличие двух способов оценки распределения эффективного атомного номера.

Томографическое восстановление данных коэффициентов путем многократного сканирования объекта позволяет получить распределение их отношений.

Для моноэнергетических источников излучения данные отношения инвариантны к вариации плотности вещества и определяются только эффективным атомным номером. Для источников с непрерывным спектром влияние на данные отношения вариации плотности слабое, но все же сохраняется.

В докладе рассматриваются преимущества и недостатки данных двух способов идентификации распределения эффективного атомного номера.

Литература

1. **Артемьев Б.В., Маслов А.И., Потапов В.Н., Ведерников М.Б.** Использование рентгеновских толщиномеров в производстве проката цветных металлов // Дефектоскопия. 2003. № 6. С. 55 – 61.
2. **Рентгеновские** комплексы на основе регистрации трансмиссионного и обратно рассеянного излучения / Б.В. Артемьев, Е.О. Блохин, А.А. Буклей и др. // Контроль. Диагностика. 2012. № 12. С. 4 – 7.
3. **Горшков В.А., Рожкова Н.И., Прокопенко С.П.** Визуализация микрокальцинатов на основе выпуклой комбинации плотности и эффективного атомного номера // Контроль. Диагностика. 2013. № 11. С. 26 – 30.

4. **Jones D.E.A.** The Calculation of Effective Atomic Number, Z. // British Journal of Radiology. 1979. № 52. P. 330–331.
5. **Taylor M.L.** Robust Determination of Effective Atomic Numbers for Electron Interactions with TLD-100 and TLD-100H Thermoluminescent Detectors // Nuclear Instruments and Methods B. 2011. 269. 770 – 773.
6. **Murty R.C.** Effective Atomic Numbers of Heterogeneous Materials // Nature. 24 July 1965. 207. 398–399.
7. **Lewin J.M., Isaacs P.K., Vance V., Larke F.J.** Dual-energy Contrast-enhanced Digital Subtraction Mammography: Feasibility. // Radiology. 2003. V. 229. № 1. P. 261 – 268.
8. **Bliznakova K., Kolitsi Z., Pallikarakis N.** Dual-energy Mammography: Simulation Studies // Phys. Med. Biol. 2006. 51. 4497 – 4515.
9. **Derzhi N.** Method For Estimating Effective Atomic Number And Bulk Density Of Rock Samples Using Dual Energy X-Ray Computed Tomographic Imaging. Patent US20130028371, 2012.
10. **Heismann B.J., Leppert J., and Stierstorfer K.** Density and Atomic Number Measurements with Spectral X-ray Attenuation Method // J. Appl. Phys. 2003. 94. 2073 – 2079.

ИМПУЛЬСНАЯ СПЕКТРОЗОНАЛЬНАЯ ЦИФРОВАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ ДИАГНОСТИКА ОДНОКРАТНЫХ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

Долгих А.В.

*Российская Академия Наук, Сибирское отделение
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, г. Новосибирск, Россия*

При рентгеновской съемке неподвижных или медленно движущихся объектов имеется возможность, меняя напряжение на рентгеновской трубке, получать снимки в разных диапазонах жесткости. В настоящее время такой способ широко применяется в системах досмотрового контроля для определения качественного состава объектов. Состав объектов можно определить и количественно, учитывая спектр излучения источника, спектры поглощения объектов съемки и спектр чувствительности регистратора.

При съемке быстропротекающих или взрывных процессов необходимо получить снимки в разных диапазонах жесткости за времена порядка десятков-сотен наносекунд, либо за одну вспышку. Это возможно при использовании импульсных рентгеновских аппаратов (ИРА). Для получения снимков в разных диапазонах жесткости за одну вспышку можно использовать детекторы, разделенные поглотителем. Задача усложняется также тем, что спектр

излучения используемых рентгеновских аппаратов со взрывной эмиссией непредсказуемо меняется от вспышки к вспышке, т.е. методика численного решения с использованием табулированных спектров ИРА дает большие ошибки при решении обратной задачи по определению толщин вдоль луча.

В работе предложена цифровая методика, позволяющая путем размещения на одном снимке с объектом калибровочных клиньев из тех же веществ, что и объект, получить количество каждого вещества вдоль луча, не зная спектра ИРА и спектров поглощения объектов. По калибровочным клиньям с известными размерами, состоящим из двух веществ создаются двумерные таблицы поглощения для каждого детектора. Из полученных таблиц методом перебора для каждой точки рентгеновского снимка находят значения, соответствующие одинаковому сочетанию поглощений на разных детекторах. Таким образом решается обратная задача по нахождению толщин или парциальных концентраций веществ.

Методика проверена на исследовании взаимодействия кумулятивных струй с преградами. При помощи ImagePlate-детекторов на основе соединений BaSrFBrI:Eu, разделенных поглотителем, во взрывных экспериментах получены снимки объектов и калибровочных клиньев в разных диапазонах жесткости. Определены толщины фрагментов струи и мишени. Полученные результаты взрывных экспериментов показали эффективность предложенной импульсной спектральной методики.

Работа выполнена при поддержке Проекта Президиума РАН 2.10.

РЕНТГЕНОВСКАЯ ТОМОГРАФИЯ ТРУБ ИЗ СУЩЕСТВЕННО НЕПОЛНЫХ ДАННЫХ

Золотарев С.А., Венгринович В.Л.

Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Байесовский итерационный метод (ВИМ) позволяет находить наиболее вероятные решения для распознавания образов и изображений. В данной работе описывается его применение для восстановления трехмерных изображений из множества двумерных проекционных изображений труб при значительной нехватке базовой информации. Общим путем для преодоления таких ограничений является использование итерационного подхода для пошаговой реконструкции необходимого трехмерного изображения, получаемого, как правило, в результате последовательных приближений с использованием ВИМ. В качестве априорной информации используются статистические свойства реконструируемого изображения, различные способы, задания которых рассматриваются в докладе.

Для улучшения качества получаемых изображений труб в данной работе использован метод минимизация тотальной вариации, позволяющий подавлять нелинейный шум в реконструированном изображении [1]. Модель тотальной вариации для подавления анизотропного шума в оригинальном изображении (f) может быть представлена как минимизация выражения:

$$\min_u \left[\|\nabla_x u\|_1 + \|\nabla_y u\|_1 + \frac{\mu}{2} \|u - f\|_2^2 \right], \quad (1)$$

где μ – соответствующим образом выбранный положительный параметр, причем,

$$\|u\|_p = \left(\sum_{1 \leq i, j \leq N} |u(i, j)|^p \right)^{\frac{1}{p}}, \quad (2)$$

для $1 \leq p < \infty$.

Метод минимизации тотальной вариации применяется на каждом шаге итерационной процедуры. Для того, чтобы удалить шум в трехмерном изображении, тотальная вариация должна быть минимизирована в каждом слое изображения. Итерационная схема обеспечивает сходимость последовательности изображений u^k к искомому изображению u^* , которое представляет собой изображение (f) без шумовой компоненты [1]. $\lim_{k \rightarrow \infty} u^k = u^*$ если $0 < \lambda/\mu < 1/8$.

Рисунок 1 показывает шесть из шестидесяти полученных рентгеновских проекций трубы с диаметром 89 мм и толщиной стенки 10 мм. Рентгеновские проекции были получены при напряжении на рентгеновской трубке равном всего 170 кВ. Недостаточная энергия рентгеновского источника вызвала сильное размытие в реконструированном изображении вследствие эффектов рассеяния и ужесточения пучка рентгеновских лучей.

Рисунок 2 показывает поперечное сечение в области сварного шва после реконструкции из шестидесяти проекций, что обычно совершенно недостаточно для качественной томографии, и перспективный вид реконструированного изображения трубы, где маркер показывает пространственное положение одного из дефектов (свищ). Реконструкция произведена с помощью традиционного ВІR-метода. Использован разработанный нами ранее метод оболочечной реконструкции кусочно-однородных объектов.

На рисунке 3 показано изображение того же сечения, но полученного с помощью применения метода тотальной вариации как на этапе обработки проекционных данных (коррекция проекций), так и на этапе реконструкции. Наблюдается значительное улучшение контраста и увеличение в несколько раз отношения сигнал/шум.

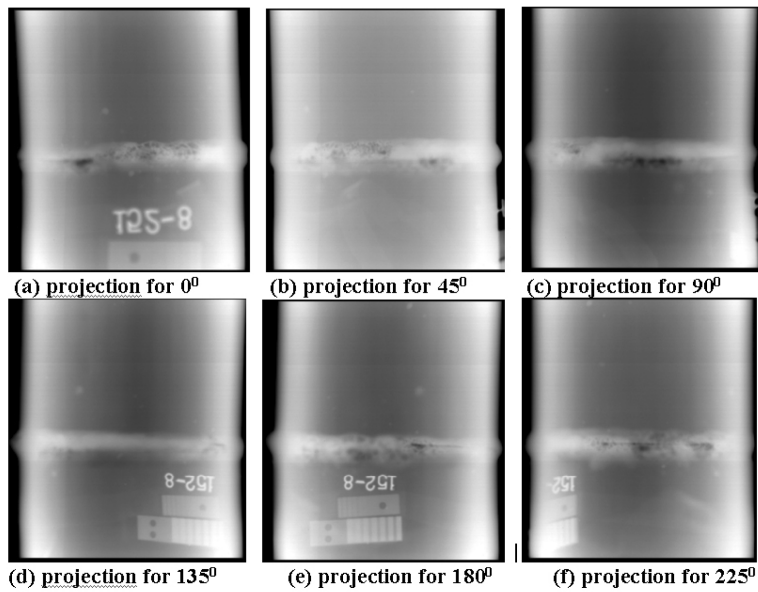


Рис. 1. Рентгеновские проекции тестовой трубы

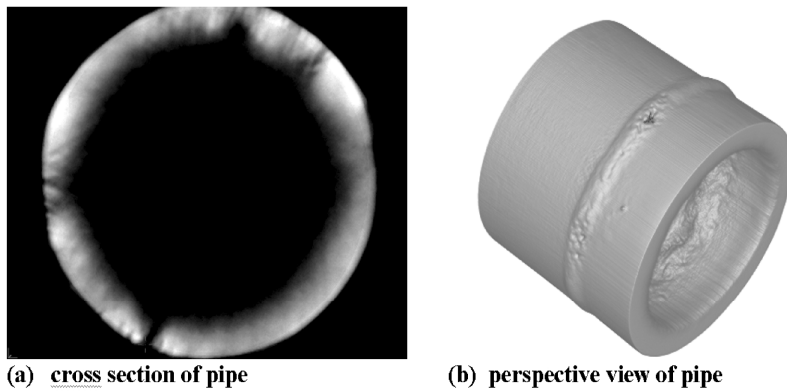


Рис. 2. Поперечное сечение и перспективный вид реконструированного изображения трубы

С помощью профилирования трехмерного изображения (рис. 3) можно виртуально измерить как плотность материала трубы, так и толщины сечений в любой точке, и действительные размеры дефектов. Дальнейшая бинаризация полученного изображения позволяет значительно облегчить процедуру измерения размеров.

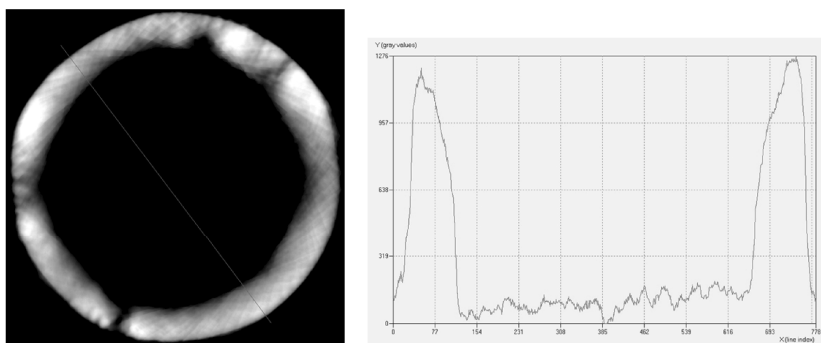


Рис. 3. Поперечное сечение трубы и профиль вдоль линии, проходящей через центр. Реконструкция сделана с использованием скорректированных проекций и минимизации тотальной вариации

Дальнейшие исследования должны быть сфокусированы на поиске новых путей адекватного введения априорной информации в алгоритмы реконструкции и преодолении основных ограничений на недостаточность входных экспериментальных данных.

Литература

1. **Jia R.Q.** A fast algorithm for the total variation model of image denoising // J. Adv. Comput. Math., 2010. 33. P. 231 – 241.

ТЕХНОЛОГИИ РАДИОИЗОТОПНОЙ РАДИОГРАФИИ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ИЗОТОПНЫХ ДЕФЕКТОСКОПОВ

Кузелев Н.Р.¹, Богод В.Б.², Берлизов Е.В.², Ковалев М.М.²
¹ЗАО «НИИИИИ МНПО «Спектр», Москва, Россия
²ЗАО «Энергомонтаж интернэшнл»

Радиографический контроль составляет основу контроля качества изделий и наиболее распространен при строительстве трубопроводов, обследовании состояния деталей и узлов. Применяя эти методы, можно просвечивать стальные изделия толщиной до 200 мм, обеспечивая при этом 1–2%-ю чувствительность к выявлению дефектов.

Технологические возможности шланговых дефектоскопов позволяют осуществлять панорамное просвечивание, фронтальное просвечивание, просвечивание труб, просвечивание в труднодоступных местах. Современная система блокировки источника и урановый блок защиты обеспечивают высокую безопасность эксплуатации дефектоскопов.

Решена задача: Разработка конкурентоспособных дефектоскопов → организация отечественного серийного производства → полный объем оборудования и сервиса → обеспечение российского рынка и конкуренция на зарубежных рынках.

Созданы специализированные производства оборудования и принадлежностей: в г. Москве, г. Муром (Владимирская обл.), г. Сходне (Московская область). В г. Дмитровграде (Ульяновская обл.) для серийного выпуска источников излучения. Организованы инжиниринговые услуги, сервисное обслуживание, авторский надзор, ремонт, снятие с эксплуатации.

ТЕХНОЛОГИЯ ЭКСПРЕСС-ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МОНОКРИСТАЛЛОВ

Лифшиц В.А., Осес Е.Р., Потрахов Е.Н.
ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед» (Технопарк СПбГЭТУ),
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет им. В.И. Ульянова (Ленина) «ЛЭТИ»

Введение

Одна из основных технологических задач при производстве изделий из монокристаллов, например, изготовлении турбинных лопаток методом направленной кристаллизации, определение кристаллографической ориентации (КГО), а при наличии в отливке зубзерен – величины их разориентации с основным кристаллом. Объектами контроля в этом случае являются стержни-заготовки перед нарезкой на затравочные пластины, сами затравочные пластины, конусы лопаток, а также помеченные при металлографическом анализе отдельные участки поверхности готовых отливок [1].

В настоящее время в отечественной промышленности такие измерения осуществляются в основном на дифрактометрах общего назначения семейства ДРОН дифрактометрическим методом [2]. Так на дифрактометре ДРОН-7 с приставкой ПГТМ можно проводить измерение КГО стержней, затравок и конусов лопаток, а на дифрактометре ДРОН-8 с держателем больших образцов – и самих лопаток с точностью до 0,001°. Однако, если объект контроля имеет сложную форму или значительные размеры, измерения в выбранных точках поверхности объекта требуют длительного времени и в целом вызывают большие затруднения.

Для контроля подобных объектов также используются и специализированные установки, реализующие рентгеновскую съемку по методу Лауэ. Установки типа «Scorpio» (Великобритания), «Galaxy XRD» (Германия), MWL 110 (США) с цифровыми двухкоординатными приемниками излучения, в отличие от ДРОНов, позволяют получать и обрабатывать лауэграммы, а также проводить вычисления КГО с точностью до 0,25° [3]. Методика контроля предполагает, что оператор в режиме реального времени наблю-

дает за изменениями лауэграммы при поворотах исследуемого объекта относительно осей, проходящих через точку съемки. Поэтому такие установки содержат много «точной» механики, имеют большие габариты, вес, энергопотребление и стоимость. При этом необходимость размещения в специализированных помещениях практически исключает массовое применение таких установок на моторостроительных предприятиях.

Материалы и методы

Для оперативного решения задач технологического контроля при производстве монокристалльных изделий была разработана передвижная рентгенодиагностическая установка ПРДУ «КРОС» (далее ПРДУ). ПРДУ предназначена для съемки обратных лауэграмм (эпиграмм) от различных точек на поверхности объекта контроля.

Общий вид установки показан на рис. 1. Установка включает в себя рентгенозащитную камеру, в которой размещены двухкоординатный столик образца и штатив, несущий моноблок источника рентгеновского излучения,

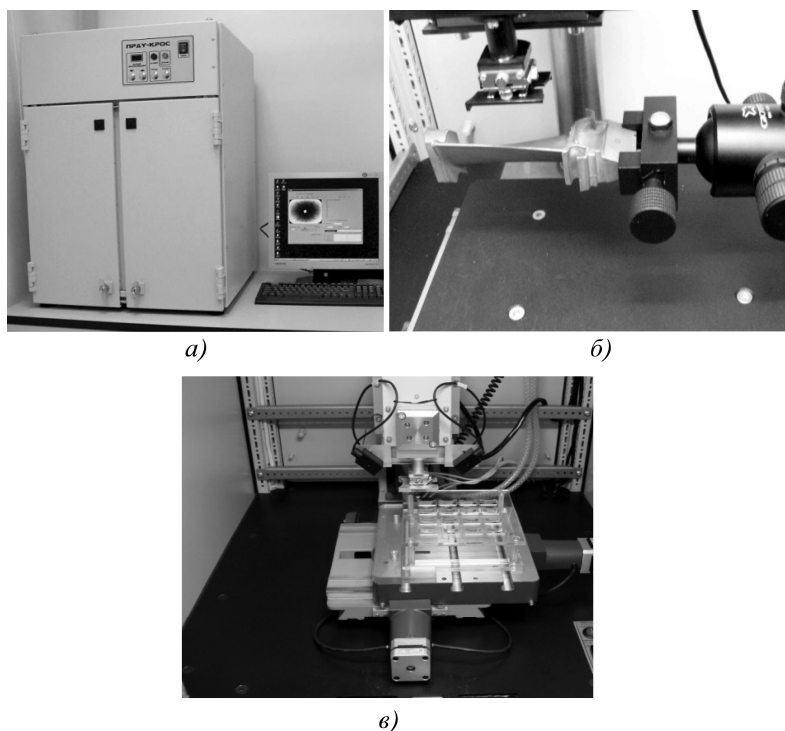


Рис. 1. Передвижная рентгенодифракционная установка ПРДУ «КРОС»:
a – общий вид; *б, в* – образцы в держателях
с двухкоординатными автоматизированными подвижками

а также сканер для считывания дифракционной картины с плоского позиционно-чувствительного детектора на основе экрана с фотостимулируемым люминофором (ФСЛ-экран) и персональный компьютер со специализированным программным обеспечением.

Двухкоординатный столик позволяет позиционировать объект исследования под пучком излучения в ручном режиме или автоматически по заранее заданной программе. Моноблок источника излучения выполнен на основе рентгеновской трубки БСВ-33. Режимы работы трубки устанавливаются и индицируются с помощью микропроцессорного пульта управления вручную или посредством внешнего компьютера. На моноблоке укреплен ФСЛ-экран.

В процессе контроля пучок первичного рентгеновского излучения направляется на объект исследования. Местоположение пучка излучения на объекте индицируется с помощью двух лазерных указателей. Дифрагированное рентгеновское излучение регистрируется ФСЛ-экраном формата 30×40 мм. Время регистрации составляет несколько десятков секунд. После считывания посредством лазерного сканера полученные лауэграммы обрабатываются с помощью специализированного программного обеспечения [4].

На установку ПРДУ «КРОС» оформлены все необходимые разрешительные документы. В соответствии с действующими нормативами РФ она освобождена от контроля и учета органами Роспотребнадзора.

Результаты и обсуждение

1. При контроле КГО программное обеспечение выполняет автоматическое распознавание лауэ-рефлексов (пятен) на эпиграмме, определение их координат и преобразование эпиграммы в стереографическую проекцию. Начальное совмещение экспериментальной (полученной) стереограммы с фрагментом стандартной стереограммы ГЦК- или ОЦК-кристалла производится в диалоге с оператором.

«Повороты» стандартной сетки относительно трех координатных осей осуществляются пересчетом координат всех узлов сетки. Совпадение лауэ-рефлексов означает, что индексы НКЛ зарегистрированных рефлексов определены. Параметры оптимального совмещения для всей совокупности пар пятен программа находит автоматически. Отслеживаются «повороты» системы координат, связанной со стандартной сеткой, относительно приборной системы координат. Информация о положении кристаллографических осей монокристалла выдается в форме матриц направляющих косинусов. Разориентировка основного зерна и субзерна вычисляется как угол единственного «поворота» решетки (определяется угол этого поворота и соотношение НКЛ индексов оси поворота).

Программа может работать с любыми монокристаллами кубической сингонии. Разработаны версии измерения КГО для кристаллографических осей [001] и [111]. Оператор в большинстве случаев может сразу распо-

знать характерное расположение рефлексов и в ручном режиме совместить соответствующий фрагмент теоретической стереограммы с экспериментальной стереограммой, тем самым сокращая время измерений.

При совмещении 15 - 20 пар пятен экспериментальной эпиграммы с теоретической средняя ошибка для пары совмещаемых пятен составляет порядка $0,2^\circ$. Сама процедура финишного автоматического совмещения эпиграмм совершается с воспроизводимостью около $0,1^\circ$.

Погрешность при измерении параметра «кристаллографическая ориентация» (КГО) – величина отклонения заданной кристаллографической оси от нормали к исследуемому шлифу (или от нормали к плоскости координатного стола, на котором установлен образец) не превышает $0,2^\circ$. При определении азимутальной ориентации – угла «поворота» решетки относительно указанной нормали погрешность не превышает $0,5^\circ$.

Литература

1. Сидохин Ф.А., Сидохин А.Ф., Сидохин Е.Ф. Об определении кристаллографической ориентации монокристаллов методом Лауэ // Заводская лаборатория. 2009. Т.75, № 1. С. 35 – 37.

2. Опыт использования дифрактометра ДРОН-8 с приставкой ПГТМ для исследования текстур / В.Ф. Шамрай, В.А. Лифшиц, В.Н. Серебрянный и др. // Заводская лаборатория. 2009. № 1. С. 32 – 34.

3. Потрахов Н.Н., Лифшиц В.А., Осес Р., Потрахов Е.Н. К методике исследования покрытий на монокристаллах с кубической решеткой // Сборник тезисов 12-й конференции «Быстрозакаленные материалы и покрытия». 2013. Т. 1. С. 315 – 320.

4. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ 2011614448. Программа расшифровки обратных лауэграмм ГЦК-монокристаллов для определения кристаллографической ориентации образцов (КГО-анализ) / Осес Р.Х., Лифшиц В.А., Потрахов Н.Н., Потрахов Е.Н. Зарег. 6.06.2011.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СКАНИРУЮЩИЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ КОНТРОЛЬ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Муханова Т.А.

ОАО ЦНИИ Специального машиностроения, г. Хотьково, Московской обл.

Рентгеновский метод, который в силу своих несомненных преимуществ (бесконтактность, наглядность, одномоментность контроля и т.д.) занимает важное место в технологическом процессе изготовления изделий из ПКМ.

На основе результатов рентгеновского контроля формируется заключение о качестве изделий и уровня технологии их производства.

Значительные трудности возникают при проведении рентгеновского контроля пространственных конструкций из полимерных материалов. Они связаны с необходимостью проведения контроля в различных сечениях для обеспечения обследования 100 % объема элементов конструкции. Это приводит к необходимости:

- автоматизированного сканирования изделия в процессе контроля с его перемещением в зоне излучения по трем координатам с одновременным вращением;
- регистрации цифровых матриц видеоизображения результатов рентгеновского контроля;
- накопления и хранения больших массивов информации;
- использования специального математического аппарата обработки с целью обнаружения и идентификации дефектов.

В исполнении поставленных задач разработана и используется компьютерная технология автоматизированного рентгеновского контроля и соответствующие программно-аппаратные средства.

Состав комплекса:

- Рентгеновский аппарат кабельного типа «Экстравольт E225/P1600».
- Автоматизированный рентгенотелевизионный комплекс ФИЛИН 6Н1024М с системой улучшения изображения СОВА ПЛЮС и специальным программным и методическим обеспечением.
- Манипулятор для 3-х координатного перемещения на заданную величину (погрешность 0,2 мм) и вращения на заданный угол (погрешность 0,1 град.) изделий.
- Программное обеспечение обработки рентгеновского изображения для обнаружения и идентификации дефектов, разработанное с учетом моделирования распространения рентгеновского излучения через многослойные конструкции с дефектами [1 – 3].

Экспериментальные исследования возможности системы, в том числе возможности математической обработки специальными методами для повышения достоверности результатов, проводились путем рентгеновского контроля и обработки видеоизображений различных по конструкции и материалам изделий: многослойных пространственных структур, плит бронезащиты, резиноподобного покрытия на металлической оправке и др.

Результаты производственных испытаний показали, что разработанный комплекс решает производственные задачи по обнаружению дефектов в изделиях предприятия и имеет большой потенциал по повышению производительности и достоверности контроля.

Литература

1. **Маслов А.И.** Рентгенотехника. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1992. С. 313 – 327.
2. **Maslov A.I.** X-Ray Equipment. Moscow, Mashinostroenie, 1998.
3. **Маслов А.И.** Достижения и перспективы развития рентгеновской толщинометрии. М.: ЦНИИТЭИ приборостроения ТС-7, 1989. 44 с.
4. **Маслов А.И.** Рентгеновская толщинометрия. Приборы и системы управления. 1989. 35 с.
5. **Пат. № 2221220.** Рентгеновский измеритель параметров проката / Маслов А.И., Запужалов В.Г., Артемьев Б.В. и др. // БИ. 2004. № 1. 2004.

МИКРОФОКУСНЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ТРУБКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ С ВРАЩАЮЩИМСЯ АНОДОМ

Подымский А.А.¹, Жамова К.К.²

¹ЗАО «Светлана – Рентген»,

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина) «ЛЭТИ»

Введение

Как известно, процесс формирования рентгеновского изображения биологических объектов источниками рентгеновского излучения с фокусным пятном менее 0,1 мм имеет ряд особенностей. Благодаря чему, рентгенография с помощью таких источников, получившая определение «микрофокусная рентгенография», обладает принципиальными преимуществами по сравнению с широко используемой в настоящее время для целей медицинской диагностики классической (стандартной) рентгенографией источниками излучения с фокусным пятном около 1 мм [1]. Наиболее существенные из этих преимуществ: снижение экспозиционной дозы рентгеновского излучения при проведении рентгенодиагностических исследований, а также повышение качества и информативности получаемых рентгеновских изображений [2].

Однако отличительной особенностью микрофокусных источников рентгеновского излучения является низкая интенсивность генерируемого излучения. В практических конструкциях это обусловлено физическими ограничениями мощности, подводимой к мишени рентгеновской трубки электронным пучком малого диаметра. В настоящее время малая мощность микрофокусных рентгеновских трубок существенно сужает область применения микрофокусной рентгенографии в медицинской диагностике.

Цель и задачи исследования

Целью выполненных исследований являлось повышение электрической мощности микрофокусных рентгеновских трубок и, соответственно, – интенсивности генерируемого излучения. Задачами – поиск технологических решений, разработка конструкции, изготовление и испытания рентгеновской трубки повышенной мощности с фокусным пятном 0,1 мм и менее.

Материалы и методы

В ходе НИР исследовалась и модернизировалась конструкция классической рентгеновской трубки с вращающимся анодом типа 15-40БД46-150 производства ЗАО «Светлана – Рентген». Эскиз трубки представлен на рис. 1.

В результате модернизации трубки были внесены изменения в конструкцию катодного узла, а также – узла вращения анода: введен третий – управляющий электрод (сетка), использованы современные опоры вращения с малым «боем» [3].

Результаты и обсуждение

Испытания действующего макета модернизированной трубки проводились в два этапа.

На первом этапе в ходе статических испытаний (при неподвижном аноде) были определены максимальное рабочее напряжение, а также рентгенооптические и эмиссионные характеристики трубки. При проведении испытаний трубка была непосредственно помещена в масляную ванну.

Максимальное рабочее напряжение трубки в ходе испытаний составило 150 кВ.

В дальнейших статических испытаниях для исключения перегрева и подплавления мишени при отсутствии вращения анода это напряжение было ограничено 80 кВ.

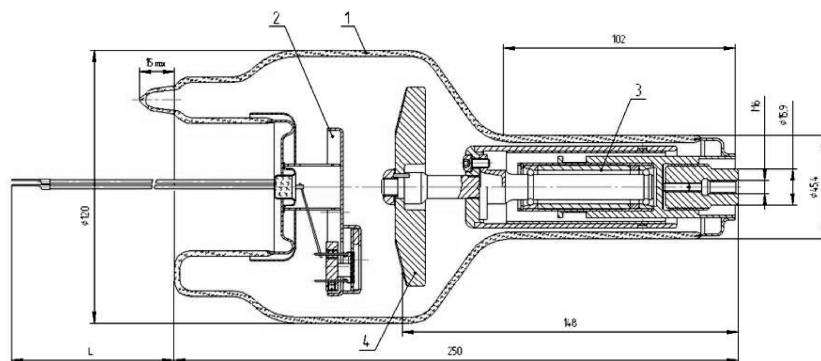


Рис. 1 Эскиз рентгеновской трубки с вращающимся анодом 15-40БД46-150:

*1 – стеклянный баллон; 2 – катодный узел; 3 – анодный узел;
4 – дисковая вольфрам-молибденовая мишень*



Рис. 2 Внешний вид излучателя ИРД-46

Оценка размеров фокусного пятна проводилась с помощью лох-камеры путем прямой съемки пятна через свинцовую диафрагму с диаметром отверстия 0,03 мм. Минимальные размеры фокусного пятна – 0,1×0,15 мм были получены при управляющем напряжении на сетке $U_{упр0} = -55$ В.

На втором этапе испытаний был определен ток трубки в динамическом режиме. С этой целью трубка была установлена в излучателе ИРД-46 стационарного рентгенодиагностического аппарата семейства «МЕДИКС» производства ЗАО «Амико» (рис. 2). Максимальная величина тока при напряжении анода 150 кВ, управляющем напряжении $U_{упр0} = -55$ В и скорости вращения анода 3000 об/мин составила 14 мА.

Таким образом, на разработанном макете модернизированной трубки была получена мощность в режиме кратковременного включения около 2 кВт, что в 100 раз больше мощности серийных отечественных микрофокусных рентгеновских трубок с прострельной мишенью семейства БС-1.

Литература

1. Потрахов Н.Н., Грязнов А.Ю. Микрофокусная рентгенография в медицинской диагностике. Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. 121 с.
2. Мазуров А.И., Потрахов Н.Н. Микрофокусная рентгенография в медицине // Медицинская техника. 2011. № 5. С. 30 – 34.
3. Пат. РФ на полезн. модель 107468. Рентгеновская трубка с вращающимся анодом / Потрахов Н.Н., Потрахов Е.Н. Заявл. 20.08.2011.

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОИНФОРМАТИВНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Потрахов Н.Н.¹, Грязнов А.Ю.¹, Мазуров А.И.²
¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
²НИПК «Электрон»

Введение

Уже в результате первых опытов В.К. Рентгена по просвечиванию различных объектов были предложены два способа получения рентгеновских изображений: контактный способ и способ съемки с увеличением изображения [1]. Однако по ряду причин, в первую очередь технологических, дальнейшее развитие в медицинской диагностике получил контактный способ съемки.

Материалы и методы

1. При съемке контактным способом (рис. 1) в стандартной рентгенографии используется источник излучения 1 с протяженным фокусным пятном d ($d_1 \approx 1$ мм). Объект съемки 2 располагается на достаточно большом расстоянии f от источника излучения 1 и вплотную – «в контакте» к приемнику изображения 3 (рис. 1, а).

Размер фокусного пятна d , а также расстояние между источником излучения и объектом f существенно влияют на качество (нерезкость Нг) изображения. При этом величина расстояния f выбирается, исходя из требований к величине нерезкости получаемых снимков, с учетом конкретных размеров фокусного пятна рентгеновской трубки d_1 и толщины объекта.

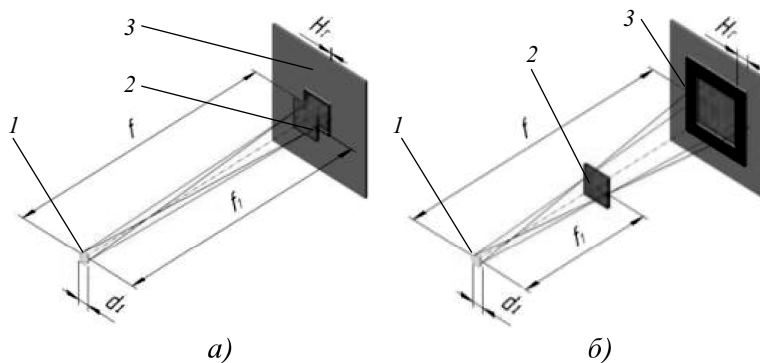


Рис. 1. Рентгенооптическая схема съемки в стандартной рентгенографии:
а – контактный способ; б – способ съемки с увеличением изображения

В общем случае отношение расстояний f и f_1 определяет коэффициент увеличения изображения объекта m по сравнению с его истинными геометрическими размерами

$$m = \frac{f}{f_1}.$$

Соответственно при контактной съемке $f \approx f_1$ и $m \approx 1$.

2. При съемке с увеличением изображения используется, так называемый, точечный источник излучения 1 . Клиническая практика рентгенодиагностики показывает, что с целью получения рентгеновских снимков с максимальной информативностью коэффициент увеличения изображения для большинства областей медицины должен составлять от трех до десяти раз [2]. Для обеспечения необходимой резкости увеличенных изображений во всем диапазоне значений коэффициента увеличения размер точечного фокусного пятна должен составлять менее 0,1 мм ($d_2 < 0,1$ мм).

Поэтому методика съемки с помощью таких источников излучения получила название «микрофокусная рентгенография». Объект съемки 2 (рис. 2) располагается на определенном расстоянии, как от источника излучения, так и от приемника изображения 3 . Независимо от того, в каком положении находится объект съемки в пространстве между фокусным пятном источника излучения и плоскостью приемника, резкость полученного изображения сохраняется (рис. 2, б).

Описанные отличительные особенности способа съемки с увеличением изображения в микрофокусной рентгенографии от контактного способа в стандартной рентгенографии получили определение «эффект увеличения глубины резкости».

Эффект увеличения глубины резкости в микрофокусной рентгенографии позволяет решить проблему выявления мелких деталей строения исследуемых органов, которая возникла вследствие замены в общей рентгенологии «пленочных» рентгеновских аппаратов цифровыми.

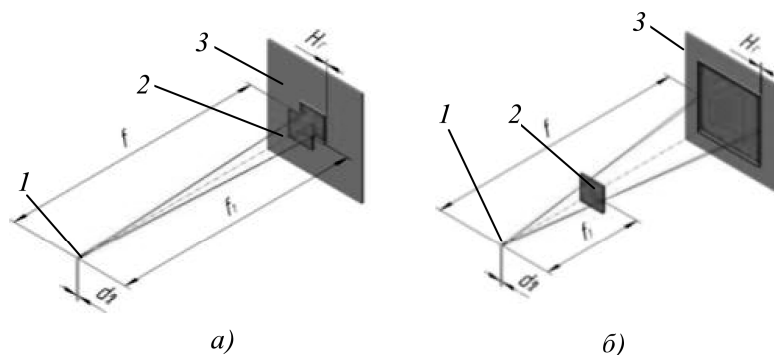


Рис. 2. Рентгенооптическая схема съемки в микрофокусной рентгенографии:
 а – контактный способ; б – способ съемки с увеличением изображения

**1. Зависимость разрешающей способности
рентгенографической системы от диаметра фокусного пятна
(разрешающая способность приемника изображения
 $R_n = 3,5$ пар лин./мм)**

d , мм	1	0,8	0,5	0,2	0,1
m_0	1,0	1,1	1,3	3,0	9,2
R_{\max} , пар лин./мм	3,6	3,7	4,0	6,1	10,6

Теоретически для заданных значений диаметра фокусного пятна рентгеновской трубки d и разрешающей способности приемника R_n существует оптимальное увеличение изображения

$$m_0 = \frac{(dR_n)^2 + 1}{(dR_n)^2},$$

при котором обеспечивается максимальная разрешающая способность рентгенографической системы R_{\max} в составе источника рентгеновского излучения и приемника рентгеновского изображения [3]

$$R_{\max} = \sqrt{R_n^2 + \left(\frac{1}{d}\right)^2} = R_n \sqrt{m_0}.$$

Результаты расчетов максимального значения разрешающей способности рентгенографической системы в зависимости от размеров фокусного пятна рентгеновской трубки при «разрешении» приемника изображения $R_n = 3,5$ пар лин./мм представлены в таблице.

Таким образом, на рентгеновском аппарате с фокусным пятном $d = 0,1$ мм и приемнике изображения с $R_n = 3,5$ пар лин./мм при съемке с увеличением изображения можно получить почти в три раза большую по сравнению с контактной съемкой на аппарате с фокусным пятном $d = 1$ мм разрешающую способность рентгенографической системы. Следовательно, оснащение цифровых рентгенографических систем микрофокусными источниками излучения для получения увеличенных изображений области интереса повысит повысить их диагностические возможности по распознаванию мелких структур объекта исследования.

Литература

1. **Основы** рентгенодиагностической техники // Под ред. Н.Н. Блинова: Учебное пособие. М.: Медицина, 2002. 392 с.

2. Алпатова В.Г., Васильев А.Ю., Кисельникова Л.П. Сравнительная оценка информативности цифровой микрофокусной рентгенографии с многократным увеличением изображения и радиовизиографии в эксперименте // Клиническая стоматология. 2010. №1. С. 23–24.

3. Блинов Н.Н., Мазуров А.И. Разрешающая способность систем воспроизведения рентгеновского изображения // Медицинская техника. 2000. № 5. С. 12 – 15.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МЕЧЕННЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КИМБЕРЛИТОВОЙ ПОРОДЫ

Рогов Ю.Н.

ООО «Нейтронные технологии», г. Дубна, Россия

Введение

В настоящее время в технологическом процессе обогащения алмазо-содержащего кимберлита проводится дезинтеграция в дробилках или валковых прессах с последующим самоизмельчением руды до частиц размера 0,2 мм и меньше, после чего производится обогащение руды. Основным недостатком существующего метода добычи алмазов является то, что при дроблении кусков кимберлита могут быть разрушены наиболее ценные крупные алмазы, массой в несколько карат.

ООО «Нейтронные технологии», по заказу АК «АЛРОСА», разработало новую технологию обнаружения крупных алмазов в кимберлитовой породе без ее разрушения. Суть методики состоит в облучении крупных кусков кимберлита быстрыми нейтронами с энергией 14 МэВ, которые возникают в бинарной ядерной реакции $d + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + n$.

Меченые нейтроны, попадая в кимберлитовую породу, индуцируют реакции неупругого рассеяния, в результате которых возбуждение ядра снимается испусканием γ -квантов с энергетическим спектром, характерным для каждого химического элемента. Регистрация характеристического γ -излучения осуществляется гамма – детекторами в совпадениях с сигналом от α -детектора. Дополнительное измерение длительности временного интервала между сигналами с α - и γ -детекторов позволяет определить все три координаты области исследуемого образца, в которой определяется элементный состав.

Применение ММН для поиска алмазов сводится к обнаружению избытка углерода в образце кимберлита. Способность ММН определять

трехмерное положение искомого вещества позволяет не только установить факт наличия крупного алмаза в куске породы, но и определить, в каком месте образца он расположен. Это позволяет осуществить селекцию кимберлитовой руды и определить куски породы, содержащие крупные алмазы до стадии мелкого дробления.

Нами был разработан метод автоматического обнаружения алмазов в кимберлитовой породе и создана экспериментальная установка по поиску алмазов, на которой были выполнены эксперименты по измерению крупности обнаруживаемого алмаза для различных фоновых условий.

Основные результаты

Экспериментальная установка по поиску алмазов в кимберлите состоит из портативного нейтронного генератора ИНГ-27 со встроенным 64-пиксельным альфа-детектором, шести гамма – детекторов на основе кристаллов ВGO, электроники системы сбора данных с альфа- и гамма-детекторов, блоков питания нейтронного генератора (НГ) и альфа- и гамма-детекторов.

Постановка эксперимента сводится к облучению куска кимберлитовой породы с или без образца имитатора алмаза, расположенного за кимберлитом. Таким способом имитируется кусок породы, содержащий в себе алмаз. В некоторых экспериментах имитатор алмаза располагался между кусками породы. Для экспериментов с имитаторами алмазов получены превышения локального сигнала от углерода от 20 до 3 σ , где σ – статистическая ошибка данного измерения, для масс имитатора от 11 до 1,15 г и толщины кимберлитовой породы от 1 до 4 см.

На втором этапе АК «АЛРОСА» для проверки методики предоставила нам 55 кг кимберлитовой породы со склада рудника «Мир» в виде 33 образцов. Образцы кимберлита, переданные нам на втором этапе работы, представляли собой камни неправильной формы, с типичными линейными размерами 10...20 см и толщиной 4...10 см. При обследовании образцов кимберлита в 32 образцах не было отмечено статистически значимого превышения локального содержания углерода над средним. Наблюдаемое отклонение от среднего по всем образцам не превышало 2,5 σ .

В одном из образцов, в образце № 17, было обнаружено существенное локальное превышение углерода над средним уровнем. Величина превышения локального содержания углерода над средним составило от 3,3 до 5,8 σ , в зависимости от ракурса, под которым облучался образец. После возвращения образцов в г. Мирный был проведен анализ образца № 17 с превышением углерода. В нем обнаружили два неоднородных алмазных включения, диаметром до 7 мм, состоящих из мелких частиц размером от 1 до 2 мм.

Обсуждение результатов

Результаты проведенных опытов свидетельствуют о том, что задача автоматического обнаружения имитатора-алмаза, расположенного внутри кусков кимберлита успешно решена. Разработанный алгоритм правильно идентифицирует положение имитатора алмаза.

По результатам облучения 33 образцов кимберлитовой породы со склада рудника «Мир» можно сделать предположение, что предлагаемая методика приводит к небольшому проценту ложных положительных тревог (хотя статистика для подтверждения этого утверждения пока недостаточна). При этом были найдены алмазные включения в образце, в котором было зафиксировано повышенное локальное содержание углерода. Таким образом, экспериментально продемонстрирована способность метода меченых нейтронов обнаруживать алмазы в кимберлите.

Литература

1. **Геммология** алмаза / Ю.П. Солодова, М.В. Николаев, К.К. Курба-тов и др. М., 2008. 416 с.
2. **Hawkins P.O., Sutton R.W.** Rev. Sci. Instr. 31 (1960) 241.
3. **Ussery L.I.** et al., Los Alamos Nat. Lab report LA12847-MS (October 1994).
4. **Rhodes E.** et al., SPIE, v. 2092, p. 288 (1993); E.Rodes et al., IEEE Trans. Nucl. Science, 39 (1992) 1041 – 1045.
5. **Beyerle A., JHurley.P., Tunnell L.**, Nucl.Instr.Meth. A299 (1990) 458.
6. **Pesenti S.** et al., Nucl. Instr. Meth., A531 (2004) 657.
7. **Bystritsky V.M.** et al., Proceedings of the 4th International Symposium on Technology and Mine Problem, Naval Postgraduate School, March 13 – 16, Monterey, California, 2000.
8. **Bystritsky V.M.** et al., Proceedings of the International Conference on Requirements and Technologies for the Detection, Removal and Neutralization of Landmines and UXO, EUDEM2-SCOT–2003, 15 – 18 September 2003, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium, 2003, v 1, 2.
9. **Bystritsky V.M.** et al., Proc. Conference «Portable neutron generators and technologies on their basis», Moscow, 2004, p. 283.
10. **Bystritsky V.M.** et al., JINR Communications, E13-2006-36, 2006.
11. **Bystritsky V.M.** et al., Physics of Particles and Nuclei Letters, 5 (2008) 441.
12. **Bystritsky V.M.** et al., Physics of Particles and Nuclei Letters, 10 (2013) 860.
13. **Препринт** Объединенного Института Ядерных Исследований / В.Ю. Алексахин и др. Дубна, 2013. P18-2013-132.

ПЕРЕНОСНЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

Усачев В.Е.¹, Усачев Е.Ю.², Гнедин М.М.¹

¹ООО «Диагностика-М», Москва, Россия

²МГТУ МИРЭА

Доклад посвящен разработке переносных рентгеновских комплексов для обследования состояния объектов. Рассмотрены исходные требования к техническим характеристикам комплексов и приведены результаты, достигнутые по конкретным направлениям работ.

Отмечены особенности процесса обследования технического состояния сварных соединений действующих трубопроводов и обоснована необходимость применения для этих целей цифровой радиографии. Даны основные технические характеристики разработанных переносных установок цифровой радиографии и результаты экспериментальных работ.

Разработка переносных рентгеновских комплексов замкнутого цикла, т.е. позволяющих получить, оценить и архивировать информацию о состоянии обследуемого объекта в реальном масштабе времени на месте контроля, была начата в связи с необходимостью проведения проверки почтовой корреспонденции и багажа с целью выявления незаконных вложений.

Растущие объемы указанной работы определили следующие основные требования к техническим характеристикам комплекса:

– исполнение комплекса в составе следующих основных блоков: рентгеновский излучатель, рентгеновский преобразователь и блок управления, обработки и отображения информации;

– масса отдельного переносимого блока не должна превышать 15 кг;

– масса комплекса в транспортной упаковке не должна превышать 30 кг;

– в состав комплекса должен входить сменный встроенный сетевой блок питания от 110...240 В или аккумуляторный блок питания в комплекте с зарядным устройством;

– пространственное разрешение должно быть не менее 1,5 пар линий/мм;

– максимальное анодное напряжение 160 кВ, постоянного потенциала, регулируемое;

– размер фокусного пятна не более 1 мм;

– блок управления должен совмещать опции управления источником, процессора и монитора

– объем памяти блока управления не менее 30 000 снимков

– удаление блока излучателя от блока управления до 50 м.

Разработанный рентгентелевизионный комплекс «НОРКА» обычно поставляется в трех основных комплектациях в зависимости от используемого анодного напряжения (НОРКА 120, НОРКА 150 и НОРКА 160), но в состав комплекса могут входить различные излучатели, в том числе микрофокусные и острофокусные, преобразователи, блоки управления, дополнительное оборудование.

В качестве детекторов излучения используются люминесцентные экраны и сменный камерный блок СКБ-3Д с ПЗС матрицей 1280×1024.

На переносной рентгеновский комплекс выдан патент РФ на полезную модель № 93153 U1 RU от 25.05.2009.

Разработка и организация серийного выпуска рентгентелевизионного комплекса «НОРКА» обеспечила выполнение поставленной задачи; об уровне и технико-экономических показателях разработки свидетельствует тот факт, что комплексы были поставлены в 22 страны мира.

Помимо решения основной задачи комплексы «НОРКА» успешно применялись и для решения отдельных задач неразрушающего контроля, но, в целом, это носило эпизодический характер.

Основным препятствием была чувствительность и разрешение контроля, не удовлетворяющие требованиям производства.

Известно, что в ряде отраслей промышленности, как например, нефтехимическая, атомная сдаточный радиационный контроль сварных соединений технологических трубопроводов осуществляется на мелкозернистую радиографическую пленку. В процессе работы действующие трубопроводы периодически подвергаются обследованию с целью выявления недопустимых эксплуатационных повреждений, таких как очаги коррозии (эрозии) и трещины.

Выявление подобных повреждений, имеющих, как правило, малое раскрытие и сложную ориентацию, требует проведения повторного контроля с чувствительностью, не уступающей сдаточному контролю.

Возникает противоречие: подвергнуть сварные соединения повторно радиографическому контролю на мелкозернистую пленку очень дорого и долго, применяя рентгентелевизионные комплексы типа «НОРКА» получим низкую достоверность обследования, пропуск возможных дефектов.

Выходом из сложившейся ситуации является применение метода цифровой радиографии с использованием матричных детекторов.

Цифровая радиография – радиационный метод контроля с использованием электронных устройств или носителей, преобразующих прошедшее излучение в массив аналоговых сигналов, которые затем оцифровываются и передаются в компьютер для отображения в виде цифрового изображения, соответствующего радиационной энергии полученной на входе устройства.

Отмечается [1], что цифровая радиография с использованием матричных детекторов (DDAs) обеспечивает по сравнению с использованием фосфорных пластин изображения (CR) лучшую чувствительность контроля.

В проекте международного стандарта [2] указано « следует применять цифровую матричную детекторную систему DDA без скоплений «битых» пикселей, а так же компьютерную радиографию CR для выявления несплошностей, которые равны или больше, чем 3×3 пикселей для индикаций в виде пятен, и которые равны или больше, чем 1×9 пикселей для плоскостных индикаций на цифровом изображении».

Отсюда следует, что для гарантированного достижения высокой чувствительности размер пикселя детектора должен находиться в диапазоне ≤ 50 мкм.

По результатам поиска выбран плоскопараллельный матричный детектор CMOS, разработанный специально для цифровой радиографии, с размером пикселя порядка 48 мкм, что позволит блоку формирования изображений достичь требуемого базового пространственного разрешения детектора 10 пар линий/мм

Исходя из условий работы по обследованию действующих трубопроводов и с учетом требований по оптимизации весовых, габаритных и радиационно-оптических характеристик источника излучения, для комплектации комплекса «НОРКА ПД-1», были выбраны выпускаемые серийно рентгеновский аппарат РИ-160Н и блок управления БУ-4 (монитор). Они входят в комплекс «НОРКА», ранее разработанный ООО « Диагностика-М». При этом, анодный ток аппарата был повышен до 1 мА, что при необходимости экспертной оценки, позволяет без дополнительных переустановок провести пленочную радиографию (пленка D4) интересующего участка.

Была дополнительно проведена разработка держателя матричного детектора, блока формирования изображения и программного обеспечения к нему.

Программное обеспечение комплекса предусматривает сохранение полученного первичного изображения сварного соединения, а также настроек при его обработке.

Проведенная оценка полученных показателей качества изображения образцов сварных соединений, а также производственное опробование на Нововоронежской АЭС показали, что достигнутые показатели комплекса обеспечивают выполнение требований 1-го класса ГОСТ 7512–82 и соответствуют классу В по ISO 17636-2. [4].

На переносной рентгеновский комплекс цифровой радиографии подана заявка регистрационный № 2013144769 от 04.10.2013 о выдаче патента РФ на полезную модель.

Литература

1. **Uwe Zscherpel, Uwe Ewert, Klaus Bavendiek, Mirko Jechow.** Strategies for Film Replacement in Radiography – Approaches Used in the New Standards // International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography. Berlin, Germany, 2011.
2. **Draft ISO/DIS 17636-2.** Non-destructive Testing of Welds. Radiographic Testing. Part 2. X-and Gamma-ray Techniques with Digital Detectors.
3. **EN462-5.** Non-destructive Testing. Image Quality of Radiographs. Part 5: Image Quality Indicators (Duplex wire Type), Determination of Image Unsharpness Value.
4. **ISO 17636-2: 2010.** Non-destructive Testing of Welds. Radiographic Testing. Part 2. X-and Gamma-ray Techniques with Digital Detectors.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВЕЩЕСТВ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ДУАЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ. АЛГОРИТМЫ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Чахлов С.В.¹, Осипов С.П.², Клименов В.А.^{1,2},
Темник А.К.¹, Тонкоглаз В.А.²,
Sun Xiaoming³, Hu Xiaowei³, Li Suqi³

¹Национальный исследовательский Томский
политехнический университет, г. Томск, Россия,

²Томский государственный архитектурно-строительный
университет, г. Томск, Россия,

³PowerScanCompanyLimited, Пекин, Китай

Одной из наиболее важных проблем, стоящих перед таможенными службами различных стран, является обнаружение грузов, перевозка которых законодательно запрещена либо строго регламентирована принимающей или выпускающей стороной. Решение указанной выше проблемы невозможно без идентификации вещества, из которого состоит объект контроля (ОК). Под идентификацией вещества понимается отнесение вещества объекта контроля тем или иным способом по тому или иному критерию к одному из достаточно широких классов веществ. Анализируется, как правило, четыре класса веществ. К первому классу относятся органические вещества, плотность которых близка 1 г/см^3 , а эффективный атомный номер к 6. Ко второму классу относятся металлы или минеральные вещества с плотностью $2...3 \text{ г/см}^3$ и эффективным атомным номером от 11 до 15 единиц. К третьему классу относятся металлы с плотностью $6...8 \text{ г/см}^3$ и

эффективным атомным номером от 24 до 30. К четвертому классу относятся тяжелые металлы с высокой плотностью $9...13 \text{ г/см}^3$ и эффективным атомным номером 40 единиц и более. Для решения задач идентификации в последнее десятилетие достаточно успешно применяют специальную реализацию цифровой теневой радиографии [1 – 3], называемую методом дуальных энергий (МДЭ). В методе дуальных энергий в результате совместной обработки изображений, сформированных для двух, специальным образом подобранных максимальных энергий рентгеновского излучения, получают конечное изображение идентификационного параметра, которое либо подвергается визуальному или автоматическому анализу непосредственно, либо анализируется совместно с исходными изображениями.

Большие толщины объектов досмотрового контроля являются усложняющим фактором для задачи идентификации, существенно снижающим качество распознавания при прочих равных условиях относительно малогабаритных объектов. Снижение качества распознавания связано с тем, что для досмотрового контроля крупногабаритных объектов применяются источники высокоэнергетического рентгеновского излучения – линейные ускорители электронов и бетатроны с максимальной энергией в энергетическом спектре излучения в диапазоне от 1 до 9 МэВ. В указанном диапазоне максимальных энергий рентгеновского излучения единственным существенным эффектом взаимодействия фотонов с веществом, сечение которого значимо зависит от эффективного атомного номера, является эффект рождения пар, вклад которого во взаимодействие фотонного излучения с веществом незначителен даже для материалов с большим эффективным атомным номером [4].

В 2013 г. сотрудниками Национального исследовательского Томского политехнического университета, Томского государственного архитектурно-строительного университета и фирмы PowerScanCompanyLimited (Пекин, Китай) был проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований. В процессе исследований теоретически и экспериментально сравнивались три основных способа совместной обработки исходных радиографических изображений $Y(E_1)$, $Y(E_2)$, максимальные энергии рентгеновского излучения E_1 и E_2 связаны соотношением $E_1 < E_2$. Первый из них является классическим [5], он основан на использовании предварительной информации о спектральном составе регистрируемого рентгеновского излучения и совместном решении двух интегрально-параметрических уравнений. В результате формируется два промежуточных изображения, первое из которых **A** определяется плотностью вещества ОК, а второе **B** – произведением плотности на эффективный атомный номер. Идентификация осуществляется по изображению, яркость которого в точке равна отношению яркости в точке второго изображения к яркости в точке первого изображения. Второй способ обработки первичных радиографических изображений [1] основан на получении регрессионных зависимостей

$\mathbf{A} = \mathbf{F}_1\{\mathbf{Y}(E_1), \mathbf{Y}(E_2)\}$ и $\mathbf{B} = \mathbf{F}_2\{\mathbf{Y}(E_1), \mathbf{Y}(E_2)\}$, дальнейшая же обработка информации и последующая идентификация такие же, как и в первом способе. Третий способ основан на построении идентификационного изображения \mathbf{P} [6–7], яркость которого в каждой точке равна отношению соответствующих яркостей изображений $\mathbf{Y}(E_2)$ и $\mathbf{Y}(E_1)$. В дальнейшем яркость $P(x, y)$ в каждой точке (x, y) изображения \mathbf{P} , но рассматриваемая как функция от $Y(x, y, E_1)$, сравнивается с уровнями кривыми [6] на предмет попадания в некоторую полосу. Полоса между двумя соседними уровнями, которые являются функциями от $\mathbf{Y}(E_1)$, ассоциируется с определенным классом веществ. Близость значения $P\{Y(x, y, E_1)\}$ к центру полосы свидетельствует о высокой достоверности распознавания. Уровневые кривые находятся в результате обработки пар радиографических изображений специальных тестовых объектов, к фрагментам которых выдвигаются высокие требования, особенно к размерам фрагментов объекта в направлении, перпендикулярном щелевому пучку рентгеновского излучения. Указанные требования необходимы для вычисления уровней кривых с высокой точностью. В результате экспериментального сравнения второго и третьего способа обработки первичных радиографических изображений был сделан выбор в пользу третьего, так как он менее чувствителен к влиянию многих физических факторов. Первый способ сложен в реализации, он требует определения приборных энергетических спектров высокоэнергетического импульсного рентгеновского излучения, поэтому был исключен из практического рассмотрения.

На основе выбранного алгоритма идентификации веществ ОК и их фрагментов высокоэнергетическим МДЭ была разработана программа DUAL для идентификации веществ объектов контроля и их фрагментов. Программа включает в себя несколько блоков. Первый блок – калибровка по «черному». Второй блок – калибровка по «белому». Третий блок – нормировка по «опорному каналу». Четвертый блок позволяет вычислить средние значения и дисперсии сигналов по любым прямоугольным фрагментам изображений объекта контроля. Четвертый блок включает в себя блоки фильтрации радиографических изображений (5 способов). В пятом блоке формируется цифровое изображение параметра идентификации (2 способа). Шестой блок предназначен для раскраски одного из первичных радиографических изображений (3 палитры). На досмотровом комплексе Томского политехнического университета было проведено в период с апреля 2013 г. по октябрь 2013 г. несколько серий экспериментов по оценке работоспособности алгоритма идентификации. В качестве источника высокоэнергетического тормозного излучения в досмотровом комплексе использовался бетатрон МИБ–4,5/9. Первичные радиографические изображения формировали для двух пар максимальных энергий высокоэнергетического рентгеновского излучения (4,5...9 МэВ и 4,5...7,5 МэВ). Варьирова-

лось также количество накапливаемых импульсов для меньшей энергии – 1, 2 и 3 импульса, для большей энергии число интегрируемых импульсов оставалось неизменным – 1 импульс. В процессе проведения экспериментальных исследований скорость перемещения объекта контроля изменяли в диапазоне от 0,1 м/с до 2 м/с. Максимальная экспозиционная доза источника высокоэнергетического излучения – 5 Р/мин. Тестовый объект содержал фрагменты из полиэтилена, алюминия, стали и свинца толщиной ρh от 20 до 100 г/см². Размеры фрагментов в направлениях, перпендикулярных направлению просвечивания, не менее 100 мм.

Анализ результатов экспериментальных исследований показал работоспособность предлагаемого алгоритма идентификации для исследуемого диапазона толщин фрагментов. Значения уровневых кривых, полученных теоретическим путем, близки к соответствующим экспериментальным зависимостям. Значимой зависимости качества идентификации от геометрического положения и ориентации фрагментов из различных материалов обнаружено не было, что свидетельствует о правильном выборе направлений исследований.

Литература

1. **Rebuffel V., Dinten J.M.** Dual-energy X-ray Imaging: Benefits and Limits // *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2007. Vol. 49. No 10. P. 589 – 594.
2. **Недавний О.И., Осипов С.П., Касьянов С.В.** Исследование возможности применения малогабаритных бетатронов для идентификации веществ объектов контроля методом дуальных энергий // *Контроль. Диагностика*. 2008. № 8. С. 46 – 52.
3. **Ogorodnikov S., Petrunin V.** Processing of Interlaced Images in 4–10 MeV Dual Energy Customs System for Material Recognition // *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*. 2002. Vol. 5. No 10. P. 104701.1 – 104701.12.
4. **Hubbell J.H.** Review and History of Photon Cross Section Calculations // *Physics in Medicine and Biology*. 2006. Vol. 51. No. 13. P. R1 – R22.
5. **Недавний О.И., Осипов С.П., Сидуленко О.А.** Вычислительные аспекты двухэнергетической цифровой рентгенографии // *Дефектоскопия*. 2002. № 3. С. 81 – 85.
6. **Чахлов С.В., Осипов С.П.** Высокоэнергетический метод дуальных энергий для идентификации веществ объектов контроля // *Контроль. Диагностика*. 2013. № 9. С. 9 – 17.
7. **Fuchs T., Keßling P., Firsching M., Nachtrab F., Scholz G.** Industrial Applications of Dual X-ray Energy Computed Tomography (2X-CT) // *Nondestructive Testing of Materials and Structures*. Springer Netherlands. 2013. Vol. 6. P. 97 – 103.

ТРАНСМИССИОННАЯ РАДИАЦИОННАЯ ТОМОГРАФИЯ И ТОМОГРАФИЯ НА ОБРАТНОРАССЕЯННОМ ИЗЛУЧЕНИИ – ВОЗМОЖНОСТИ

Юмашев В.М., Самосадный В.Т., Кадилин В.В.
НИЯУ МИФИ, Москва

Требования качества и совершенствование технологии изготовления изделий ведут за собой необходимость создания средств контроля с повышенной точностью и информативностью. Предупреждение возникновения аварийных ситуаций в атомной энергетике, авиакосмической технике, химической и нефтегазовой промышленности, машиностроении и металлургии нельзя полностью гарантировать существующими средствами контроля. К более надежным новейшим средствам относится радиационная компьютерная томография.

В докладе представлены возможности решения задач контроля промышленных изделий с помощью применения радионуклидных средств интроскопии и томографии на изделиях авиационной технике. Приведены результаты контроля.

Для контроля изделий с односторонним доступом к контролируемому объекту рассмотрен способ томографии на обратно рассеянном излучении. Показаны возможности совместного использования трансмиссионной компьютерной томографии (ТКТ) и томографии на рассеянном излучении, что позволяет получать инвариантно распределения плотности и эффективного атомного номера вещества контролируемого изделия.

Представлен макетный образец томографа и полученные результаты контроля.

Показано, что использование методов (ТКТ) и томографии на обратно рассеянном излучении, основанных на решении обратных задач, позволяет получить распределение материалов в количественном виде, а совместное использование дает возможность получить их в виде физических величин.

Литература

1. Кузелев Н.Р., Маклашевский В.Я., Юмашев В.М., Иванов И.В. Диагностика состояния деталей и узлов авиатехники с помощью радионуклидной компьютерной томографии // Дефектоскопия. 1995. № 2. с. 39.
2. Горшков В.А., Аносов Ю.В., Кузелев Н.Р., Юмашев В.М. Томография на рассеянном неколлимированном рентгеновском излучении: Сборник докладов научной сессии МИФИ. 2003. Ч. 5. С. 49.
3. Gorshkov V.A., Yumashev V.M., and others, «X-Ray Tomography on the Base of Non-collimated Radiation», International Symposium on Computed Tomography and Image Processing for Industrial Radiology, June 23 – 25, 2003, Berlin, Germany.
4. Маклашевский В.Я., Кузелев Н.Р., Юмашев В.М. Радиационная интроскопия и томография слоистых материалов в авиационной и космической технике. Заводская лаборатория. 2005. № 3. С. 45.

СЕКЦИЯ 5. ОПТИЧЕСКИЕ, ТЕПЛОВЫЕ, МИКРОВОЛНОВЫЕ МЕТОДЫ НК И ТД

Руководители секции: Вавилов В.П., Абрамова Е.В., Матвеев В.И.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ В ЭКСПЕРТИЗЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Абрамова Е.В., Быстрова Н.А., Белкин В.К., Галкин Д.И., Оношко Н.В.
*ФГАУ «НУЦ «Сварка и контроль»
при МГТУ им. Н.Э.Баумана», Москва, Россия*

Конечная цель применения любого метода неразрушающего контроля (НК) – не просто выявить дефект, а оценить влияние наличия этого дефекта на остаточный ресурс объекта, а в случае теплового контроля – определить, в том числе и его энергоэффективность.

Информация о результатах диагностики опасного производственного объекта методами НК ложится в основание анализа его реальных эксплуатационных характеристик при проведении экспертизы промышленной безопасности (ЭПБ), целью которой является оценка соответствия технического устройства требованиям правил и нормативных документов в области (ПБ) [1 – 3].

Тепловой метод, в силу того, что он применяется для обследования функционирующих (действующих) технических устройств и сооружений, находящихся под нагрузкой, позволяет выявить наиболее напряженные участки контролируемого объекта с точки зрения выявления температурных превышений по сравнению с качественными зонами, находящимися в тех же условиях [4 – 6].

Авторами проведено обследование газовой шахтной плавильной печи типа SCR-5700 тепловым методом для решения задач ЭПБ.

Газовая шахтная плавильная печь, входит в состав комплекса литейно-прокатного агрегата типа SCR-5700 производства медной катанки из электролитической меди по методу непрерывного литья и проката и работает в непрерывном режиме. Шахта печи, состоящая из сварных секций, изнутри футерована огнеупорными материалами. В ней используются горелки с двухстенной водоохлаждающей подводящей трубой. Кроме того, водяное охлаждение обеспечивает долгий срок службы горелки и предотвращает повреждение секций кожуха печи из-за их перегрева. Обследование проводилось как на «холодной» печи, так и в рабочем состоянии (в период процесса плавки).

Для изучения температурных проявлений на конструкции шахтной плавильной печи был использован дистанционный метод регистрации и анализа тепловых полей. Исследование производилось тепловизором NEC G100. Точность измерений составляет ± 2 °С или 2 % от значений показаний при температурной чувствительности 0,08 °С.

Выявленные температурные аномалии в основном располагались вблизи горелок, и было рекомендовано исследовать эти участки более подробно другими методами НК, например, ультразвуковыми, определялась толщина и твердость материала защитного металлического корпуса футерованной стенки плавильной печи.

Определение основных механических характеристик металла выполнялось неразрушающим методом с определением временного сопротивления с помощью твердомера динамического действия «ТЭМП-3» [7, 8]. Твердость для многих материалов близко связана с пределом прочности σ_b . По измеренным значениям был проведен расчет σ_b . Анализ результатов измерений и расчетов показал, что механические характеристики металла кожуха печи удовлетворяют требованиям.

Толщинометрия стенок защитного корпуса печи может быть произведена разными методами НК [9]. Ультразвуковая толщинометрия проводилась с целью определения количественных характеристик утонения стенок в процессе эксплуатации. Результаты измерений толщины стенки кожуха печи являются исходными данными для прочностного расчета и определения остаточного срока эксплуатации или уровня снижения рабочих параметров. Проведенная процедура толщинометрии утонения стенок кожуха ниже допустимого не обнаружила [10, 11].

В результате изучения температурных воздействий на металлоконструкции шахтной печи установлено, что несущая конструкция (кожух), подверженная температурному воздействию, эксплуатируется в температурном режиме, установленном проектной и технологической документацией, при этом разброс температур составил от 90 до 200 °С на корпусе, от 170 до 370 °С на горелках.

На рисунке 1 показан пример полученной термограммы стенки корпуса плавильной печи.

Прогнозирование остаточного ресурса шахтной печи предполагает в качестве критерия предельного состояния оценивать изменение механических свойств металла кожуха печи, поскольку все остальные элементы печи (футеровка, горелки газовые и др.) заменяются в процессе эксплуатации по мере их износа [12].

Ресурс на эти элементы определен самой технологией и контролируется в процессе эксплуатации в соответствии с проектно-конструкторской и эксплуатационной документацией, графиком ППР на технологическое оборудование и не влияет на остаточный ресурс эксплуатации агрегата [13].

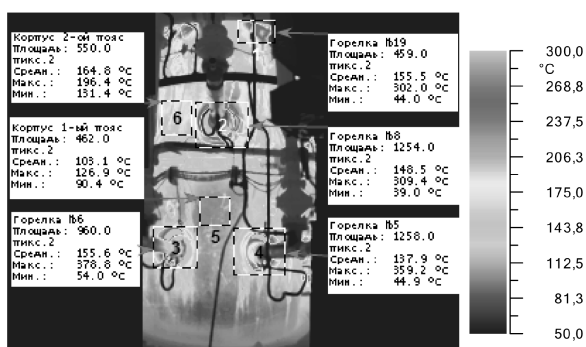


Рис. 1. Горелки № 5, № 6, № 8. Термограмма поверхности

При комплексном обследовании агрегата установлено, что его техническое состояние удовлетворительное и основным повреждающим фактором является равномерная коррозия (эрозия) [14].

Анализ представленных документов (по объему и содержанию), результаты технического диагностирования объекта экспертизы позволили сделать вывод о соответствии технического устройства – газовой шахтной плавильной печи типа SCR-5700 стандартам, нормам и правилам промышленной безопасности.

Литература

1. **О промышленной безопасности опасных производственных объектов:** Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ.
2. **Технический регламент о безопасности машин и оборудования** (Утвержден постановлением Правительства РФ от 15.09.2009 № 75).
3. **ПБ 03-246–98.** Правила проведения экспертизы промышленной безопасности.
4. **РД 13-04–2006.** Методические рекомендации о порядке проведения теплового контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах.
5. **РД 153-34.0-20.364–00.** Методика инфракрасной диагностики тепломеханического оборудования.

6. **Будадин О.Н., Вавилов В.П., Абрамова Е.В.** Тепловой контроль. Диагностика безопасности / Под общ. ред. академика РАН В.В. Клюева. М.: Издательский дом «Спектр», 2011. 171 с.
7. **ГОСТ 23677–88.** Твердомеры для металлов. Общие технические требования.
8. **ГОСТ 22761–77.** Металлы и сплавы. Измерения твердости по Бринеллю переносными твердомерами статического действия.
9. **Пат.** на изобретение RUS 2172930. Рентгеновский толщиномер / Артемьев Б.В., Егоров И.В., Запускалов В.Г., Маслов А.И., Ролик В.А. от 10.04.2000.
10. **ГОСТ 28702–90.** Контроль неразрушающий. Толщиномеры ультразвуковые. Общие технические требования.
11. **ОСТ 26-11-09–85.** Поковки и штамповки сосудов и аппаратов, работающих под давлением. Методика ультразвукового контроля.
12. **ГОСТ 14249–89.** Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.
13. **Исламов М.Ш.** Проектирование и эксплуатация промышленных печей. Л.: Химия, 1986. 280 с.
14. **ДиОР-05.** Методика диагностирования технического состояния и определения остаточного ресурса технологического оборудования нефтеперерабатывающих, нефтехимических производств.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВИЗОРОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРОБЛЕМ С КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Бардаков А.В.
ООО «Флюк СИИЭЭС», Москва, Россия

Тепловизоры традиционно используются для диагностики электрооборудования. Однако с неисправностью электрооборудования связаны тепловые потери за счет выделения тепла на дефектах или неисправно работающем оборудовании. Так же проблемы, связанные с качеством электроэнергии, которые приводят к неэффективности работы оборудования, проявляют себя в виде избыточного выделения тепла, что может быть выявлено с помощью тепловизоров. В зависимости от типов обнаруживаемых проблем можно определить типичные тепловые рисунки, которые можно наблюдать в электрических системах. За появление данных рисунков могут отвечать такие проблемы с качеством электроэнергии, как несимметрия, наличие гармоник и реактивной мощности. С помощью тепловизоров мож-

но выявить данные проблемы, однако для точной диагностики требуется использование анализаторов качества электроэнергии. Для анализа потерь энергии в электрических системах в анализаторах качества электроэнергии серии Fluke 430 II используется теория объединенной мощности, позволяющая связать параметры качества электроэнергии с полной мощностью, потребляемой из электрической системы и с потерями энергии. С помощью данной теории можно выполнить разложение электрической мощности на составляющие, связанные с различными параметрами качества электроэнергии. Для выполнения такого анализа служит функция «Калькулятор потерь энергии» в анализаторах серии 430 II, позволяющая использовать анализаторы качества электроэнергии для оценки величины потерь.

НОВЫЕ ТЕПЛОВИЗОРЫ FLUKE TI400, TI300, TI200 И ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ФОКУСИРОВКИ LASERSHARP™

Бардаков А.В.

ООО «Флюк СИИЭЭС», Москва, Россия

Одной из основных проблем, с которой на практике сталкиваются термографисты при работе с приборами, является проблема точной фокусировки в ИК диапазоне. Фокусировка является основным параметром, определяющим качество изображения и точность полученных результатов измерений с помощью тепловизоров. В предыдущих моделях тепловизоров для решения данной проблемы использовалась технология объединения ИК и видимого изображения IR-Fusion®, в которой объединение изображения происходило за счет контроля расстояния, на которое сфокусирована ИК система. Визуально для пользователя это выглядело как совмещение ИК и видимого изображения в момент получения точной фокусировки. Однако по результатам собственной статистики, составленной компанией в 2011 г., несмотря даже на такие возможности, количество ошибок, связанных с неточной фокусировкой, может достигать до 39 %.

Альтернативным решением проблемы фокусировки может быть система LaserSharp™, использующая измерение расстояния до объекта с помощью встроенного лазера и выполняющую фокусировку ИК системы на соответствующее расстояние. Использование такого подхода позволило ускорить процесс фокусировки и практически полностью исключить ошибки оператора при визуальном контроле наведения на объект с помощью лазерного указателя. При этом данная система фокусировки сохраняет возможность ручной фокусировки, которая традиционно применялась в тепловизорах Fluke.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ ЛОПАТОК ТУРБИН ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СЛОЖНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Бекаревич А.А.¹, Велиахметов С.А.², Чумаков А.Г.², Будадин О.Н.³

¹НИТУ МИСИС, Москва, Россия,

²ФГУП ММП «Салют»,

³ОАО ЦНИИ Специального машиностроения

Одной из задач теплового контроля является идентификация вида дефектов и оценка порога принятия решения о допуске изделия в эксплуатацию. При этом решение задачи оценки надежности по результатам неразрушающего контроля не реализовано для лопаток турбин при достаточно высоком уровне доверительной вероятности.

Лопатки турбин являются одними из наиболее сложных и ответственных деталей газотурбинного двигателя (ГТД). Они работают в условиях высоких температур и нагрузок. От надежности лопаток турбин во многом зависят ресурс и экономичность ГТД в эксплуатации. В свою очередь надежность лопаток определяется качеством их изготовления и контроля.

Существующие методы контроля производства и эксплуатации лопаток турбин высокого давления (ТВД) – метод вихревых токов, рентгеновский метод и др., дают лишь косвенную информацию об особенностях тепловых режимов работы лопаток и не позволяют делать вывод об эффективности системы их охлаждения. Тепловой метод контроля позволяет непосредственно оценивать как качество охлаждения лопаток, так и оценивать величину возможного перегрева. В перспективе это позволит определять и ресурс работы лопатки.

Трудности диагностики системы охлаждения лопатки тепловым методом обусловлены конструкцией лопатки, внутренние каналы которой имеют малые геометрические размеры и сложную форму проточной части. При этом высокая теплопроводность материала лопатки приводит к быстрому растеканию тепла и сильному выравниванию температуры на ее поверхности. Кроме того, неоднородность коэффициента излучения поверхности лопатки вызывает существенные артефакты, которые могут превышать эффект от реального температурного перепада. Для решения этих проблем идут по пути интенсификации теплообмена и повышении быстродействия контроля. При этом возникает нестационарный режим, в течение которого проявляются особенности внутренней структуры лопаток. Тем не менее, использование сравнительно недорогих тепловизоров и регулярного режима теплообмена также позволяет получить интегральные оценки качества охлаждения лопатки в различных зонах. Для этого необходимо использование специальных алгоритмов обработки, которые позволят

отфильтровать артефакты и выявить слабо охлаждаемые зоны в рамках регулярного режима.

В связи с актуальностью существующей проблемы на предприятиях ФГУП «ММП «САЛЮТ» и НИТУ МИСиС была разработана методика теплового контроля турбинных лопаток, реализующий ее пакет программ совместно с базой данных, а также спроектирована и изготовлена автоматизированная установка АСТКЛ, в настоящее время применяемая в производстве.

Сущность разработанной методики заключается в предварительном нагреве лопатки с последующим ее охлаждением сжатым воздухом, продуваемым через внутренние каналы. Процесс охлаждения фиксируется с помощью тепловизора и результаты измерения поля температур обрабатываются по оригинальному алгоритму. Полученные результаты сравнивают с эталонными и на основании сравнения делается вывод о наличии дефектов. Кроме того дается оценка пригодности лопатки для использования.

Использование дополнительных специальных методик позволяет на основании полученных результатов при тепловой дефектоскопии лопатки оценить поле температур лопатки при ее работе в составе ГТД.

В основу метода тепловизионного контроля эффективности охлаждения рабочих лопаток турбины положен метод регулярного теплового режима, широко используемый при исследованиях нестационарных процессов теплообмена.

При охлаждении тела в среде с постоянной температурой изменение во времени избыточной температуры тела в любой его точке начиная с некоторого момента времени может быть описано уравнением

$$t_i - t_0 = (t_{i0} - t_0)e^{-m(\tau_i - \tau_0)}, \quad (1)$$

где t_i – текущее значение температуры в i -й точке; t_0 – температура охлаждающего воздуха; t_{i0} – начальная температура в i -й точке; $\tau_i - \tau_0$ – интервал времени охлаждения между начальной температурой τ_i и температурой τ_0 ; m – темп охлаждения.

Наступление регулярного режима охлаждения характеризуется постоянным значением темпа охлаждения m в процессе охлаждения или нагрева и определяется из уравнения (1) его логарифмированием, а именно

$$m = -\frac{\ln(t_i - t_0) - \ln(t_{i0} - t_0)}{\tau_i - \tau_0}. \quad (2)$$

С другой стороны, согласно теории регулярного режима темп охлаждения определяется формулой

$$m = \psi \frac{F}{vc\gamma} \alpha, \quad (3)$$

где ψ – коэффициент пропорциональности, означающий отношение средней температуры поверхности к средней температуре в объеме тела; F – площадь охлаждаемой поверхности; γ – удельный вес; c – теплоемкость тела; α – коэффициент теплоотдачи.

В соответствии с разработанной в лаборатории тепловидения методикой тепловизионные испытания лопаток проводятся на переменном расходе воздуха. Исходя из анализа условий эксперимента, поперечные тепловые потоки оказываются значительно выше продольных. Это позволяет пренебречь растеканием тепла параллельно поверхности лопатки в условиях регулярного режима, и использовать уравнение (3) локально. При этом рассчитывается производная от темпа по расходу:

$$\frac{dm}{dG_{\text{охл}}} = \frac{d\left(\psi \frac{F}{vc\gamma} \alpha\right)}{dG_{\text{охл}}}, \quad \text{или} \quad \frac{dm}{dG_{\text{охл}}} = C \left(\psi \frac{d\alpha}{dG_{\text{охл}}} + \alpha \frac{d\psi}{dG_{\text{охл}}} \right), \quad (4)$$

где $C = \frac{F}{vc\gamma}$ – является конструктивной характеристикой лопатки ТВД для каждого локального участка. В частном случае – соответствующего одному пикселю на кадрах термофильма.

В принятых приближениях коэффициент ψ определяется локальными особенностями лопатки и практически не зависит от расхода. Поэтому вторым слагаемым в (4) можно пренебречь. В то же время первое зависит как от конструктивных особенности локальной области ($C\psi$), так и от качества охлаждения ($d\alpha/dG_{\text{охл}}$).

Потому предложенный параметр позволяет анализировать качество охлаждения лопатки и принимать решение о пригодности лопатки к эксплуатации по полученным данным на основании сравнения с эталонными данными. В случае частичной, или полной закупорки канала величина производной от темпа температуры по расходу воздуха для пикселей, соответствующих этому каналу, будет отличаться от эталонных величин. Аналогичным образом проявляют себя и локальные участки с ухудшенной теплопроводностью.

Оценка качества внутреннего охлаждения лопаток турбин, в частности, для выявления дефектов, вызванных наличием посторонних включений во внутренних полостях, налетами на стенках каналов охлаждения, перераспределением расхода воздуха в каналах, либо другими причинами, осуществляется автоматизированной установкой для инфракрасной диаг-

ности охлаждаемых лопаток турбин (АСТКЛ). В состав установки входят: стенд, компрессорный модуль, тепловизор и компьютер для управления установкой и обработкой получаемых результатов.

Получаемые при проведении испытаний лопаток данные позволяют прогнозировать тепловое состояние лопатки при ее работе в составе ГТД. Прогноз теплового состояния основан на сравнении реального распределения коэффициента качества внутреннего охлаждения с распределением, полученным для эталона. Кроме того предварительно проводится тепловой расчет для конкретной конструкции лопатки, результатом которого является распределение коэффициентов, связывающих результаты теплового расчета и результаты испытаний лопатки.



Рис. 1. Автоматизированная установка для инфракрасной диагностики охлаждаемых лопаток турбин (АСТКЛ)

Лопатка № 1E9026
 Неохлаждаемых зон 13,17%
 Эталон 1
 Критерий отбора 0,50
 Перепад на шум 7,00 °С
 Т рамки 165,00 °С
 Т продувки 35,00 °С
 Р начальное 4,21 кгс/см²
 Р конечное 2,74 кгс/см²
 Сглаживание есть

Градации качества
 охлаждения:
 ■ <0,25
 ■ 0,25-0,5
 ■ 0,5-0,75
 ■ >0,75



Рис. 2. Диаграмма распределения коэффициента качества охлаждения при засорении канала охлаждения в верхней части лопатки со стороны корытца лопатки

Описанная методика реализована пакетом программ, позволяющим рассчитать поле максимальных отклонений прогнозируемых температур на поверхности лопатки при ее эксплуатации от расчетных величин. На основании значений возможного перегрева при работе лопатки в составе ГТД может быть принято решение о ее пригодности.

Литература

1. **Будадин О.Н., Вавилов В.П., Абрамова Е.В.** Диагностика безопасности. Тепловой контроль / Под общей редакцией академика РАН Ключева В.В. М.: Издательский дом «Спектр», 2011, 171 с.
2. **Кулиниченко В.Р.** Справочник по теплообменным расчетам. К.: Тэхника, 1990. 165 с.
3. **Определение** эффективности охлаждения лопаток с помощью тепловидения // Тяжелое машиностроение. 1991. № 2.
4. **Копелев С.З., Слитенко А.Ф.** Конструкция и расчет систем охлаждения ГТД. Харьков: Основа, 1994. 240 с.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДИАГНОСТИКИ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Будадин О.Н., Кульков А.А.

*ОАО Центральный научно-исследовательский институт
специального машиностроения, г. Хотьково, Московской обл.*

Конструкции из полимерных композиционных материалов в последнее время находят широкое применение и являются перспективными во многих отраслях промышленности (машиностроении, авиационной, космической), так как обеспечивают минимальный вес при заданном значении прочности [1 – 5] и обладают сочетанием свойств, каждое из которых, по отдельности, присуще различным материалам.

Ниже в приведены результаты исследований по созданию новых технологий неразрушающего контроля и возможности применения комплексирования результатов для повышения достоверности результатов контроля и оценки надежности контролируемых изделий.

Проведенные исследования позволили разработать методику создания и отработки технологий неразрушающего контроля. Она включает операции от исследования характеристик реальных дефектов и моделирования процесса диагностики, до метрологической аттестации.

Детальное исследование дефектов заключалось в анализе конфигурации, типов дефектов, глубины их залегания и раскрытия, в результате чего определяются эти параметры, которые находятся в основании разрабатываемых технологий НК.

Следующий этап – разработка методов обнаружения и распознавания дефектов. Определяются характеристики, которые целесообразно использовать в качестве информативных при проведении контроля.

Разработаны алгоритмы распознавания малоразмерных дефектов в условиях неопределенности их формы в процессе автоматизированного неразрушающего контроля. Исследован метод безэталонного определения порогового значения сигнала.

Решены задачи моделирования процесса ультразвукового теневого, акустического и теплового контроля, что позволяет определять предварительные режимы контроля.

Проведенный комплекс работ позволил создать квазиоптимальные технические и программные средства и разработать технологии (методики) неразрушающего контроля материалов и конструкций из ПКМ сложных пространственных форм:

- автоматизированного рентгеновского контроля;
- специализированные автоматизированные системы контроля крупных, мало и среднегабаритных изделий сложной формы поверхности, включающая автоматизированную механическую систему контроля с компьютерным управлением и специальные программные средства обнаружения и распознавания дефектов;
- автоматизированную систему контроля радиопрозрачности;
- для обеспечения ручного контроля крупногабаритных многослойных конструкций разработана специальная система ориентации ультразвуковых преобразователей (погрешность системы измерения толщины резиноподобного покрытия на металлической форме и на полимерной подложке);
- технология и аппаратура ультразвуковой термографии;
- технология и аппаратура голографической интерферометрии с тепловым или механическим силовым нагружением контролируемых изделий;
- технология диагностики сосудов, работающих под давлением, включающая их нагружение теплой водой и регистрацию температурного поля поверхности в процессе нагружения;
- технология и аппаратура диагностики областей концентраторов напряжений конструкций в процессе их силового нагружения по анализу температурных полей;
- разработаны математические методы комплексирования информации (многоканального неразрушающего контроля).

Вывод

Описаны современные технологий неразрушающего контроля и технической диагностики конструкций из полимерных композиционных материалов, разработанные, включающие этапы: исследования объектов контроля, моделирование технологий контроля, разработка методов обнаружения и распознавания дефектов, создание методов и средств НК и ТД, комплексирование информации многоканального НК и оптимизации работы операторов.

Литература

1. **Барынин В.А., Будадин О.Н., Кульков А.А.** Современные технологии неразрушающего контроля конструкций из полимерных композиционных материалов. М.: ИД «Спектр», 2013. 243 с.

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБЪЕКТИВНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ В РЕАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Будадин О.Н., Абрамова Е.В., Лизунов О.Н.

Одной из величин, определяющих энергоэффективность строительной конструкции (в том числе величину сверхнормативных потерь через ограждающие конструкции), а, следовательно, определение которой входит в обязательном порядке в технологию энергетического аудита, является термическое сопротивление. Это определено рядом нормативных документов, например [1] и др.

Большинство проблем, возникающих при определении этой величины, заключались в том, что, как правило, методы ее определения «работают» в условиях стационарности процесса теплопередачи через ограждающую конструкцию, в то время, как в действительности процесс являлся сугубо нестационарным. Это приводило к ограничению возможности определения сопротивления теплопередаче и к большой погрешности получаемых результатов. Решение этой проблемы впервые было предложено в работе [2] и развито в работе [3].

Оно заключается в решении обратной задачи нестационарной теплопроводности в многослойной среде. Метод универсален и в настоящее время находит широкое применение на практике.

Однако его применение выявило и сдерживается рядом недостатков, которые заключаются в следующем:

- имеется существенная нелинейная зависимость точности получаемых результатов от погрешности входных данных – результатов первичных измерений. Это приводит к необходимости обеспечивать малые значения погрешности результатов первичных измерений, что требует применение специальных измерительных приборов, квалифицированных операторов и т.п. Помимо этого, требуется соблюдение специальных климатических условий при проведении измерений;

- наличие ошибки входных данных может привести к случаю, когда обратная задача не сходится, т.е. будет отсутствовать решение;

- решением обратной задачи, как правило, является не само сопротивление теплопередаче, а величина теплопроводности одного из слоев, обычно слоя с наименьшим сопротивлением теплопередаче – теплоизоляционного слоя;

- для реализации контроля по методикам, использующим решение обратной задачи, необходимо априори знать состав и теплотехнические характеристики слоев контролируемой ограждающей конструкции (для получения теоретических температурных полей на основе математических моделей), что на практике не всегда выполнимо;

- в результате решения обратной задачи в силу специфических особенностей математического аппарата и физических принципов получаются кроме основного решения (глобального минимума функции «невязки») несколько локальных минимумов (ложных решений). Это приводит к необходимости выбора оператором нужного «истинного» решения на основе других дополнительных входных данных и др., что вносит субъективную (а значит трудно учитываемую) погрешность;

- перед применением метода обратной задачи необходимо провести цикл трудоемких исследований корректности, единственности, сходимости и устойчивости решения;

- методики контроля имеют малую производительность контроля, так как априори неизвестно, какая протяженность временной истории обеспечивает необходимую достоверность. Поэтому при проведении контроля стараются получить максимально возможную протяженность временной истории, что приводит к увеличению производительности;

- трудно обеспечить повторяемость результатов вследствие существенного влияния на результаты входных данных, и субъективной погрешности, что существенно затрудняет оценку достоверности результатов и метрологическую аттестацию методики контроля.

Кроме того, на достоверность результатов по существующим методикам большое влияние оказывает субъективный фактор: поскольку априори

известны значения теплотехнических характеристик слоев обследуемой конструкции (из проектной документации), а, следовательно, и проектное значение сопротивление теплопередаче, то существует «соблазн» для оператора слегка поправить расчетные результаты в сторону проектных значений, тем более, что процесс решения обратной задачи в силу некоторой специфики это позволяет.

Это снижает доверие к получаемым результатам.

В данной работе представлены результаты по созданию новой технологии определения сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, свободной от вышеперечисленных недостатков, в том числе исключить решение обратной задачи и априорное знание теплотехнических характеристик слоев ограждающей конструкции.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- разработан математический аппарат определения сопротивления теплопередаче в нестационарных условиях теплопередаче, основанный на методах математического анализа и математической статистики, без использования методов решения обратной задачи и априорных знаний состава ограждающей конструкции;
- проведены теоретические и экспериментальные исследования разработанной технологии и разработана методика проведения контроля;
- разработана методика метрологической аттестации технологии определения сопротивления теплопередаче в нестационарных условиях теплопередаче и проведена метрологическая аттестация методики контроля.

Выводы

1. Разработан объективный метод теплового (тепловизионного) контроля сопротивления теплопередаче многослойных строительных конструкций, позволяющий осуществлять обработку данных полностью без участия оператора.
2. Оптимизированы режимы контроля по разработанной методике. Показано, что наименьшая погрешность результатов контроля достигается при регистрации температурных историй в интервале 2,5...4 суток.
3. Проведена метрологическая аттестация методики контроля. Показано, что погрешность получаемых результатов (систематическая и случайная) не превышает 8,8 %.
4. Экспериментальные исследования методики в реальных условиях эксплуатации подтвердили результаты метрологической аттестации.
5. Разработан прибор, обеспечивающий в автономном режиме измерение термического сопротивления светопрозрачных и нестепрозрачных ограждающих конструкций без участия оператора-расчетчика.

Литература

1. **ГОСТ 26254–84.** Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. Введен постановлением Государственным комитетом СССР по делам строительства от 2.08.1984 г. № 127, срок введения установлен с 01.01.1985.
2. **Будадин О.Н., Потапов А.И. и др.** Тепловой неразрушающий контроль изделий. М.: Наука, 2002. С. 139 – 145.
3. **Будадин О.Н., Абрамова Е.В., Родин М.А., Лебедев О.В.** Тепловой неразрушающий контроль зданий и строительных сооружений // Дефектоскопия. 2003. № 5. С. 77 – 94.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ЧЕРЕЗ СВЕТОПРОЗРАЧНЫЕ ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ

Горелов М.В.

*Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального образования
Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт», Москва, Россия*

1. Введение

Тепловой неразрушающий контроль (тепловизионный метод), который сейчас широко применяется при энергетических обследованиях, позволяет оперативно получить термограммы наружных ограждающих конструкций. Однако существующие нормативные документы и методики проведения таких обследований распространяются только на несветопрозрачные ограждения. Метод тепловизионного контроля используется только для качественного анализа состояния тепловой защиты наружных ограждений. Поэтому разработка метода, который позволит оперативно количественно определить тепловые потери через светопрозрачное ограждение является актуальной и важной задачей.

Разработанный расчетно-экспериментальный метод условно можно разделить на два этапа:

- 1) экспериментальные исследования (тепловизионная съемка светопрозрачного ограждения);
- 2) определение количественных значений плотности тепловых потоков по математическим моделям «светопрозрачное ограждение – внешняя среда» или «многослойная конструкция».

Объектами исследований были однокамерный стеклопакет в ПВХ переплете и двойное остекление в деревоалюминиевом переплете. Экспери-

ментальные исследования состояли из двух этапов: контактные измерения температуры в заранее определенных точках наружной и внутренней поверхностей ограждающей конструкции, в том числе и светопрозрачной, плотности теплового потока на внутренней поверхности светопрозрачного ограждения; тепловизионная съемка наружной и внутренней поверхностей ограждения.

2. Математические модели, положенные в основу метода

2.1. Математическая модель теплообмена в системе «светопрозрачное ограждение – внешняя среда»

Математическая модель теплообмена в системе «светопрозрачное ограждение – внешняя среда» позволяет осуществить отдельный учет лучистого и конвективного потоков.

На рисунке 1 представлена геометрическая модель системы «светопрозрачное ограждение – внешняя среда», на базе которой исследуется теплообмен излучением.

Лучистая составляющая потока рассчитывалась по формуле:

$$q_{\Sigma} = \sigma_0 \varepsilon_{\text{пр}} \varphi_{12} [(273 + t_1)^4 - (273 + t_2)^4]; \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right) \varphi_{12} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right) \varphi_{21}}, \quad (2)$$

где $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана–Больцмана; $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты; t – температура излучающей или поглощающей поверхности, °С; φ – средний угловой коэффициент излучения [1].

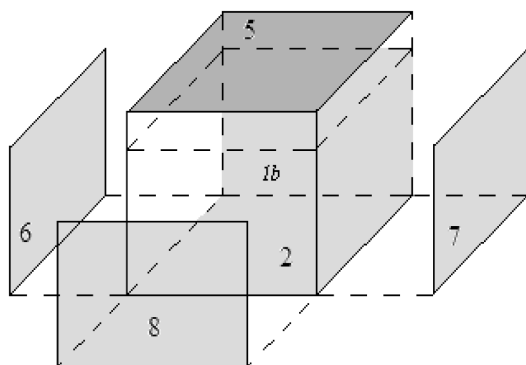


Рис. 1. Геометрическая модель системы «светопрозрачное ограждение – внешняя среда»

Для описания конвективного теплообмена между светопрозрачным ограждением и внешней средой использована система дифференциальных уравнений конвективного переноса (в том числе естественного), включая уравнения неразрывности, сохранения импульса, сохранения энергии, кинетической энергии турбулентных пульсаций и диссипации турбулентной энергии.

Для решения задачи в данной постановке использовался программный комплекс *PHOENICS*. Данный программный продукт позволяет производить расчеты локальных значений и направлений скорости воздушных потоков, коэффициентов теплоотдачи, полей температур, давлений и т.д. Алгоритм основан на аппроксимации частных дифференциальных уравнений в частных производных конечными разностями на элементарном объеме. При проведении расчетов использовалась стандартная $k - \varepsilon$ модель турбулентности [1].

2.2. Математическая модель «многослойная конструкция»

Математическая модель «многослойная конструкция» позволяет рассчитывать одномерное стационарное температурное поле и поток теплоты, проходящий через модель стеклопакета при заданных (измеренных) температурах его поверхностей и внешних источников излучения.

Математические зависимости, которые описывает процесс теплопереноса в многослойной конструкции:

$$\frac{d^2}{dx^2} t_i(x) + \frac{q_{inLi} k_i e^{-k_i x} + q_{inRi} k_i e^{-k_i x (\delta_i - x)}}{\lambda_{ci}} = 0; \quad (3)$$

$$0 < x < \delta_i, \quad t_1(x_{0,1}) = t_{sL}, \quad t_1(x_{\delta,1}) = \theta_{L,ВП}, \quad t_2(x_{0,2}) = \theta_{R,ВП}, \quad t_2(x_{\delta,2}) = t_{sR},$$

$$\lambda_{c1} \frac{t_{sL} - \theta_{L,ВП}}{\delta_1} + (q_{1inL1} - q_{1inR1}) \frac{1 - e^{-k_1 \delta_1}}{k_1 \delta_1} = q_{ВП}; \quad (4)$$

$$\lambda_{c2} \frac{\theta_{R,ВП} - t_{sR}}{\delta_2} + (q_{2inL2} - q_{2inR2}) \frac{1 - e^{-k_2 \delta_2}}{k_2 \delta_2} = q_{ВП}. \quad (5)$$

Поток теплоты через воздушную прослойку стеклопакета можно рассчитать по следующей зависимости:

$$q_{ВП} = \alpha_{ВП} (\theta_{L,ВП} - \theta_{R,ВП}), \quad (6)$$

где $\alpha_{ВП} = \alpha_{ВП}^L + \alpha_{ВП}^K$ – суммарный коэффициент теплоотдачи в воздушной прослойке; k_1, k_2 – спектральный показатель поглощения, a_i, τ_i, r_i – коэффициенты поглощения, пропускания, отражения i -стекла; q_{1inLi}, q_{1inRi} – плот-

ность потока излучения, вошедшего в i -е стекло с левой или правой стороны, Вт/м²; λ_{ci} – коэффициент теплопроводности i -го стекла, Вт/мК; $\theta_{L, \text{ВП}}$, $\theta_{R, \text{ВП}}$ – температура левой или правой границы воздушной прослойки, °С; t_{ci} – температура поверхности стекла, °С.

3. Сравнение результатов эксперимента и математического моделирования

Результаты тепловизионных измерений являлись исходными данными для разработанных математических моделей, а результаты контактных измерений использовались для их апробации.

На основе предложенных математических моделей разработан расчетно-экспериментальный метод, позволяющий определить тепловые потери зданий через светопрозрачные ограждения по тепловизионным снимкам температурных полей наружных поверхностей. Метод учитывает реальную форму здания, оптические и терморрадиационные свойства поверхностей теплообмена, условия наружной среды.

1. Результаты натурных замеров и расчетов по разработанным моделям

	Измерение прибором ИТП МГ4.03.10 «Поток»	Математическая модель «светопрозрачное ограждение – внешняя среда»				Математическая модель «многослойная конструкция»	
		$q_{\text{поток}}$, Вт/м ²	$q_{\text{СПО-ВС}}$, Вт/м ²	$q^{\text{К}}$, Вт/м ²	$q^{\text{Л}}$, Вт/м ²	δq , %	$q_{\text{МСК}}$, Вт/м ²
Эксперимент № 1	42,9	41,9	16,9	25,0	2,4	39,9	6,9
Эксперимент № 2	64,6	62,2	4,8	57,4	3,7	59,0	5,1

Литература

1. Горелов М.В. Разработка расчетно-экспериментального метода определения тепловых потерь через светопрозрачные ограждающие конструкции промышленных зданий с применением тепловизионной техники: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: НИУ «МЭИ», 2011. 20 с.

РОЛЬ ИК-ДИАГНОСТИКИ В ОБЕСПЕЧЕНИИ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ В КОРПУСЕ

Данилин Н.С., Димитров Д.М., Сабиров И.Х.,
Колесников Н.П., Булаев И.Ю., Белов Д.А.

Развитие стратегии системной микроминиатюризации в космическом приборостроении ставит ряд вопросов, среди которых и методология оценки надежности систем в корпусе и связанная с ней система обеспечения требуемого уровня качества изделий при оптимальном, с экономической точкой зрения, выходе годной продукции.

Существующая методология расчета надежности электронных компонентов, которая отражена в MIL-HDBK 217, уже неадекватна относительно определения надежности систем в корпусе по следующим причинам:

Системная интеграция требует проблемно-ориентированный подход к определению надежности. Анализ неисправностей является фундаментом для достижения требуемой надежности. При проектировании необходимо учитывать взаимосвязи по цепочке «кристалл-корпус-плата» или так называемый «co-design».

Расширенные познания по комплектующим являются гарантией изготовления систем в корпусе надлежащего уровня качества и надежности.

Моделирование на всех уровнях существенно влияет на понимание надежности.

Тестирование при использовании концепции система в корпусе имеет фундаментальное значение для их реализации.

Литература

1. Данилин Н.С., Димитров Д.М., Сабиров И.Х. Инновационные космические микросистемы в корпусе. М.: Издательский дом «Спектр», 2011.
2. Данилин Н.С. Микроминиатюрные комплектующие нового поколения для малых спутников. М.: Издательский дом «Спектр», 2013.

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРНЫХ РАЗМЕРОВ НАНОЧАСТИЦ В МЕЗОСКОПИЧЕСКИХ КОМПОЗИТАХ ПО ИХ ДИСПЕРСИОННЫМ ЗАВИСИМОСТЯМ

Демин А.В.
*ФГУП «Всероссийский институт оптико-физических измерений»,
Москва, Россия*

Доклад посвящен описанию связи характерных размеров компонент, образующих мезоскопический композит, с дисперсионными зависимостями в оптическом и терагерцовом диапазонах с учетом электродинамиче-

ских поправок на локальное поле, зависящих от размеров и формы наночастиц. В докладе представлены результаты расчета электродинамических поправок на локальное поле, отвечающих за вклад динамической деполяризации и радиационного затухания внутри наночастиц сферической и эллиптической формы. Учет данных поправок позволяет предложить более универсальные модели для нахождения комплексного показателя преломления по сравнению с традиционно используемыми электростатическими моделями эффективной среды, в частности, моделями Бруггемана и Максвелла–Гарнетта.

В рамках электростатического приближения часто используется модель эффективной среды, которая хорошо работает для нанокомпозитов, когда размер наночастиц их формирующих значительно меньше длины волны света, но заметно больше межатомного расстояния. Обычно это размеры несколько единиц или десятков нанометров. В рамках модели эффективной среды можно, зная оптические параметры каждого из компонентов композитной среды, а также их концентрации и геометрическую форму, определить эффективные параметры всей среды как целого. Для этого надо связать среднюю по объему V электрическую индукцию $\langle \mathbf{D} \rangle$ по формуле (1):

$$\langle \mathbf{D} \rangle = \frac{1}{V} \int_V \mathbf{D}(\mathbf{r}) d\mathbf{r} = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \quad (1)$$

и величину напряженности внешнего электрического поля \mathbf{E}_0 , эта связь и определяет эффективную диэлектрическую проницаемость ε_{eff} композитной среды:

$$\langle \mathbf{D} \rangle = \varepsilon_{eff} \mathbf{E}_0. \quad (2).$$

Здесь $\mathbf{D}(\mathbf{r})$, $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ и $\varepsilon_{eff}(\mathbf{r})$ – локальные (в точке с радиус-вектором \mathbf{r}) значения электрической индукции, напряженности электрического поля и диэлектрической проницаемости. Локальное поле $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ зависит от формы и размеров наночастиц, которая в большинстве реальных случаев малоизвестна и редко поддается точному описанию. Поэтому в самом общем случае интегрирование (1) встречает значительные трудности. Приходится рассматривать различные приближения, принимая во внимание локальные поля, которые определяются из задач электростатики. Одними из самых старых применяемых моделей эффективной среды являются модели Максвелла–Гарнетта [1] и Бруггемана [2]. Обе эти модели базируются на решении электростатической задачи о поле в диэлектрическом шаре.

Однако, в рамках электростатического приближения они не всегда позволяют с необходимой степенью точности описывать поведение ком-

плексного показателя преломления нанокompозитных материалов [3]. Подход, позволяющий учесть влияние размеров частиц на величину локального поля, был впервые предложен в работе [4] и впоследствии использовался в моделях эффективной среды для так называемого динамического режима [5, 6]. Разработанные модели позволяют учесть распространение электромагнитного излучения в изотропных композитах, сформированных из наночастиц сферической формы. В дипольном приближении были получены выражения для учета действительной и мнимой частей деполяризующих поправок, обусловленных конечным временем распространения излучения в наночастицах. Учет размеров компонент, образующих нанокompозит, позволяет более точно описать поведение комплексного показателя преломления, что показано на примере анизотропного мезопористого кремния. В докладе представлены расчеты комплексных диэлектрических проницаемостей и показателей поглощения искусственных композитных структур из проводящих (золото) и диэлектрических (тефлон) компонентов.

Предложенный электродинамический подход к описанию оптических свойств мезоскопических композитов предоставляет возможность оценивать характерные размеры образующих композитный материал наночастиц по их дисперсионным зависимостям. Показано, что при определенных размерах и концентрациях частичек золота подобные композитные структуры могут сильно поглощать терагерцовое излучение.

Литература

1. **Maxwell Garnett J.C.** Colours in Metal Glasses and in Metallic Films // *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 1904. Vol. 203. P. 385 – 420.
2. **Bruggeman D.A.G.** Berechnung Verschiedener Physikalischer Konstanten Von Heterogen Substanzen // *Ann. Phys. (Leipzig)*. 1935. Vol. 24. P. 634 – 664.
3. **Дисперсия** оптической анизотропии в пленках наноструктурированного кремния / Л.А. Головань, А.Ф. Константинова, К.Б. Имангазиева, Е.Ю. Круткова, В.Ю. Тимошенко, П.К. Кашкаров // *Кристаллография*, 2004. Т. 49, № 1. С. 174 – 178.
4. **Meier M., Wokaun A.** Enhanced Fields on Large Metal Particles: Dynamic Depolarization // *Opt. Lett.* 1983. Vol. 8, № 11. P. 581 – 583.
5. **Guerin C.A., Mallet P., Sentenac A.** Effective-medium Theory for Finite-size Aggregates // *J. Opt. Soc. Am. A*. 2006. Vol. 23. P. 349 – 358.
6. **Martin O.J.F., Piller N.B.** Electromagnetic scattering in polarizable backgrounds // *Phys. Rev. E*. 1998. Vol. 58. № 3. P. 3909 – 3915.

О ВОЗМОЖНОСТИ КВАЗИОПТИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРНОГО КОНТРОЛЯ ЛОКАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ОСТЕКЛОВАННОГО ЛИТОГО МИКРОПРОВОДА

Дорофеев И.О., Дунаевский Г.Е.
*Национальный исследовательский
Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Данное сообщение посвящено проблемам бесконтактной диагностики малых неоднородностей литого остеклованного микропровода, производимого по технологии Улитовского–Тейлора. Такие неоднородности могут быть критичны для многих применений этого материала, будь то прецизионный резистор, который будет полностью непригоден из-за небольшого разрыва жилы, или искусственный диэлектрик, электрофизические характеристики которого могут измениться непредсказуемым образом из-за дополнительного рассеяния на дефектах. Поэтому важной характеристикой диагностических устройств является непрерывный бесконтактный контроль не только усредненных на большом протяжении значений параметров микропровода, но и локальных неоднородностей.

Отсюда вытекают требования к методу контроля, который должен быть во-первых, высокочувствителен не только к параметрам жилы, имеющей весьма малые размеры в поперечном сечении, но и к локальной неоднородности, а во-вторых, обеспечивал бы отсутствие влияния стеклянной оболочки.

Данным требованиям удовлетворяет радиоволновый резонаторный метод контроля. Причем в качестве датчика параметров жилы микропровода предпочтительно использовать открытый резонатор СВЧ диапазона. Открытый резонатор работает в широком диапазоне частот и обеспечивает свободный доступ к измеряемому участку микропровода. В применении к таким устройствам масштаб локальной неоднородности можно определить как малый по сравнению с длиной волны используемого резонансного колебания.

В Томском государственном университете на основе теоретических и экспериментальных исследований характеристик открытых резонаторов сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн с тонкими образцами цилиндрической формы, разрабатываются устройства непрерывной бесконтактной диагностики микропровода. Рассмотрим проблему фиксации малых неоднородностей на примере образца одного из таких устройств, блок-схема которого показана на рис. 1.

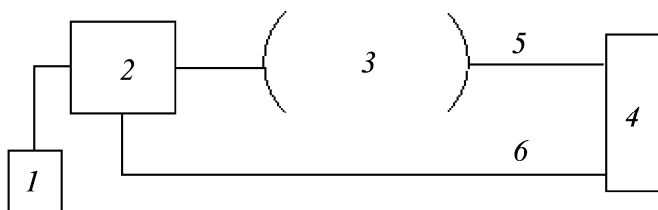


Рис. 1. Блок-схема устройства:

1 – опорный генератор; 2 – генератор, управляемый напряжением;
 3 – измерительный открытый резонатор; 4 – блок обработки;
 5 – измерительный канал; 6 – опорный канал

Как было сказано выше, в этом случае необходимо обеспечить максимально высокую чувствительность. Это влечет за собой не только оптимизацию самого резонаторного датчика, но и применение соответствующей схемы измерения. В общем случае необходимо фиксировать изменения значений резонансной частоты и добротности (полосы пропускания) резонатора. Для получения сигнала, пропорционального этим изменениям параметров резонатора был применен наиболее простой и чувствительный способ – это определение коэффициента передачи резонатора на одной из частот, соответствующей склону его резонансной кривой. Однако в этом случае повышенные требования предъявляются к источнику сигнала, который должен обладать высокой стабильностью частоты и малыми фазовыми шумами. Поэтому в данном устройстве был применен малогабаритный промышленный генератор, управляемый напряжением, со стабилизацией по опорному кварцевому генератору. Для контроля мощности служил опорный канал.

Использовался малогабаритный измерительный открытый резонатор трехсантиметрового диапазона длин волн. Выбор данного диапазона с одной стороны был обусловлен средними параметрами производимых в настоящее время микропроводов. Для наблюдения наиболее эффективного взаимодействия поля открытого резонатора с микропроводом, необходимо обеспечить полное его проникновение в объем проводника. В этом случае мы будем фиксировать реакцию открытого резонатора не только на изменение геометрических характеристик жилы, но и на изменение ее внутренних параметров (сопротивление, магнитная проницаемость). С другой стороны габариты измерительного датчика должны быть приемлемыми. Некоторые вопросы миниатюризации трехсантиметрового открытого резонатора для измерений микропровода, актуальные и для диагностики локальных неоднородностей, обсуждаются в работе [1]. Исходя из полученных в ней результатов, были выбраны следующие геометрические параметры открытого резонатора: диаметр отражателей 12 см, радиус вогнутости – 20 см, расстояние между отражателями – 12 см.

На выходной сигнал датчика существенное влияние оказывает положение проводника в открытом резонаторе, из-за сильной неоднородности поля в пространстве между отражателями. Так как локальные неоднородности предполагается выявлять в динамическом режиме (при протяжке провода через резонатор), то проблема снижения этого влияния является в данном случае актуальной. Одним из простых способов для достижения данной цели является использование наклонного расположения проводника относительно оси резонатора в плоскости электрического поля. При этом, как показано в работе [2], происходит некоторая потеря чувствительности, однако в целом для динамических режимов контроля наклонное расположение микропровода в резонаторе оправданно. Участок взаимодействия проводника с полем открытого резонатора при его наклоне в данном случае составлял величину около 12 см. Для протяженных неоднородностей выходной сигнал датчика представляет собой среднее значение по данной длине, однако для локальных неоднородностей усреднения не происходит. При протяжке микропровода, наклонно расположенного в открытом резонаторе, локальная неоднородность проходит несколько минимумов и максимумов электрического поля разной величины и, вызывает, соответственно многократное изменение выходного сигнала, также различной величины.

Для контроля медленных изменений параметров провода для таких схем необходимо проводить калибровку шкалы. В случае малых неоднородностей, в такой калибровке нет необходимости. Достаточно взять однородный участок микропровода и настроить прибор на максимальную чувствительность. При прохождении через резонатор малой неоднородности в данном устройстве происходит трехкратное изменение выходного сигнала. С помощью данного метода можно фиксировать наличие какого-либо дефекта микропровода. Для выяснения же характера неоднородности необходимы дополнительные исследования.

Были проведены протяжки участков микропровода из меди и сплава сопротивления через данное устройство для поиска локальных неоднородностей. В результате данных экспериментов обнаружено, что уже на протяжении 0,5...1,5 м как для одного, так и для другого типов проводника наблюдаются заметные трехкратные изменения выходного сигнала. Чтобы непосредственно определить структуру дефекта, далее применялся микроскоп.

Таким образом, чувствительность датчика параметров микропровода на основе открытого СВЧ резонатора оказалась достаточной не только для фиксации медленных изменений характеристик проводника на протяжении катушки, но и для локальных неоднородностей. Данные результаты свидетельствуют о перспективности применения открытых СВЧ резонаторов в устройствах бесконтактной непрерывной радиоволновой диагностики литого остекленного микропровода.

Литература

1. Дорوفеев И.О., Дунаевский Г.Е. Малогабаритный резонаторный преобразователь открытого типа для измерений параметров остеклованного литого микропровода // Измерение, контроль, информатизация: материалы XIV международной научно-практической конференции. Т. 2. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2013. С. 137 – 140.
2. Дорوفеев И.О., Дунаевский Г.Е. // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 8/2. С. 300 – 302.

ИНФРАКРАСНЫЙ ТЕРМОГРАФИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ВРАЩАЮЩИХСЯ ОБЖИГОВЫХ ПЕЧЕЙ

Захаренко В.А., Вальке А.А.

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

В настоящее время в ряде технологических процессов цветной металлургии, химической и нефтехимической промышленности, в производстве строительных материалов, в частности в производстве цемента, гипса, извести, керамзита, асфальто-бетонных смесей широко применяются сушильные и обжиговые вращающиеся трубчатые печи [1 – 4].

Эти печи являются сложными и дорогостоящими агрегатами непрерывного действия с высокотемпературными тепловыми и физико-химическими процессами внутри них.

Конструктивно печи представляют собой стальной цилиндр с наружным диаметром от 2,5 до 7,5 м и длиной до 150 м и более, обложенный изнутри огнеупорной футеровкой на основе магнезитовых и хромитовых огнеупоров [2].

При вращении печи (1...2 об/мин) и ее наклоне к горизонту, поступающий в верхний (хвостовой) конец печи сырьевой материал перемешивается и нагревается за счет теплоты сжигания топлива (уголь, газ, мазут) в головной части, двигаясь навстречу продуктам сгорания.

Очевидно, что наибольший практический интерес при эксплуатации таких печей представляют две задачи:

1) поддержание установленных технологическими требованиями температур по зонам длины печи, и прежде всего в зоне спекания, для обеспечения требуемого качества продукции, оптимизации энергозатрат и производительности;

2) раннее выявление дефектных участков на корпусе печи, связанных со сходами обмазки и повреждениями футеровки, которые могут привести к недопустимо большим температурным градиентам на стальном корпусе и, как следствие, к недопустимо большим механическим напряжениям, приводящим к повреждениям корпуса печи.

При этом решение обеих задач возможно за счет термографического инфракрасного контроля температуры наружной стенки корпуса по ее длине и окружности при помощи строчно-сканирующих преобразователей. Кроме того, решение второй задачи позволяет решать вопросы дефектометрии.

По существу это предполагает решение обратной задачи распределения температурного поля внутри печи по распределению температуры на поверхности стального корпуса. При этом дефекты (прогары) футеровочного слоя и задачи дефектометрии могут контролироваться по аномальным градиентам температур на корпусе печи.

Таким образом, решение этих задач сводится к расчетам теплопередачи от внутренней поверхности футеровки печи к наружной поверхности ее стального корпуса.

Эта задача может быть реализована на основе решения дифференциального уравнения теплопроводности и допущения стационарности процесса за период измерений, которое представляется корректным в связи со значительной тепловой инерцией как процессов внутри печи, так и большой массой ее футеровки и корпуса.

Поскольку геометрия печи представляет собой цилиндр, то дифференциальное уравнение теплопроводности при условии стационарности процессов можно представить в цилиндрических координатах как:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad (1)$$

Решение этого уравнения с учетом граничных условий первого рода позволяет получить уравнение распределение температуры $T(r)$ по радиусу корпуса печи:

$$T(r) = T_{\text{вн}} - \frac{T_{\text{вн}} - T_{\text{н}}}{\ln \frac{r_3}{r_1}} \ln \frac{r}{r_1}, \quad (2)$$

где r_1 – внутренний радиус печи; r_3 – наружный радиус стального корпуса; $T_{\text{вн}}$ – температура на внутренней поверхности футеровки печи; $T_{\text{н}}$ – температура на внешней поверхности стального корпуса.

Учитывая, что теплота от внутренней поверхности печи отдается окружающей среде конвективно и излучением, уравнение теплового баланса можно записать с учетом выражения (2) как:

$$\frac{(T_{\text{вн}} - T_{\text{н}})}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2}} = r_3 (\alpha (T_{\text{н}} - T_0) + \varepsilon \sigma (T_{\text{н}}^4 - T_0^4)), \quad (3)$$

где T_0 – температура окружающей среды, [К]; α – коэффициент теплоотдачи, [Вт/(м² К)]; ε – коэффициент черноты наружной стенки печи; σ – посто-

янная Стефана–Больцмана, [Вт/(м²·К⁴)]; λ_1 – теплопроводность футеровочного слоя, [Вт/(м·К)]; λ_2 – теплопроводность стального корпуса, [Вт/(м·К)]; r_2 – внешний радиус футеровочного слоя, [м].

Уравнение (3) позволяет получить аналитические выражения, связывающие температуру наружной поверхности корпуса печи с толщиной футеровки:

$$r_1 = \frac{r_2}{\exp\left[\left(\frac{T_{\text{вн}} - T_{\text{н}}}{r_3(\alpha(T_{\text{н}} - T_0) + \varepsilon\sigma(T_{\text{н}}^4 - T_0^4))} - \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2}\right)\lambda_1\right]} \quad (4)$$

и температуру наружной поверхности корпуса печи с внутренней температурой на футеровочной кладке печи:

$$T_{\text{вн}} = \left[r_3(\alpha(T_{\text{н}} - T_0) + \varepsilon\sigma(T_{\text{н}}^4 - T_0^4)) \left(\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} \right) \right] + T_{\text{н}}. \quad (5)$$

Выражение (4) позволяет по известной геометрии печи (размеры r_3 и r_2), при заданных температурах внутри печи по зонам и температуре окружающей среды, известных значениях констант ε , σ , λ и α определять радиус футеровочной кладки, т.е. определять ее толщину (целостность), а локализация выявленного градиента температур находить ее геометрические размеры и местонахождение на плоскости развертки цилиндра печи, т.е. решать задачу дефектометрии. При этом значения констант ε , σ , λ и α берутся из справочной литературы.

В ОмГТУ разработаны строчно-сканирующие преобразователи со спектральной чувствительностью в области 2,7...4,5 мкм, программное обеспечение которых производит по выражениям (4) и (5) расчет внутренних температур и толщины футеровки в режиме реального времени по зонам, выделенным на термографическом изображении

Список литературы

1. Сушков А.И., Троицкий И.А. *Металлургия алюминия*. М.: Изд-во Metallurgy, 1965. 517 с.
2. Колокольников В.С. *Производство цемента: Учебное пособие*. М.: Высшая школа, 1967. 303 с.
3. Бельский А.М., Дубинский М.Ю., Ладыгичев М.Г., Лиси В.Г. *Измерение температуры: теория, практика, эксперимент*. М.: Теплотехник, 2007. 736 с.
4. Захаренко В.А., Вальке А.А., Козлов А.В. Система термографического контроля промышленного назначения // Датчики и системы. 2006. № 11. С. 26 – 29.

ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ, НАПОЛНЕННЫХ ИЗОЛЯЦИОННЫМ МАСЛОМ НА ОСНОВЕ НАТУРАЛЬНЫХ СЛОЖНЫХ ЭФИРОВ

Козлов В.К., Гарифуллин М.Ш.

Казанский государственный энергетический университет

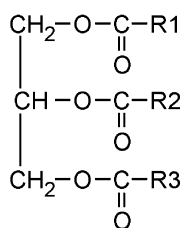
Силовые маслonaполненные трансформаторы относятся к числу ключевых элементов энергосистемы, обеспечивающих надежность электро-снабжения как крупных энергорайонов, так и отдельных потребителей электроэнергии. В современных системах диагностики и мониторинга состояния такого оборудования важная роль отводится определению качества изоляционного масла, которое служит одновременно электроизоляционной и охлаждающей средой. До недавнего времени основой всех изоляционных масел являлось минеральное масло – нефтяная фракция, выкипающая при температуре 300...400 °С и прошедшая последующую специальную переработку.

В последнее десятилетие в зарубежных энергетических компаниях наметилась тенденции на замену минерального масла диэлектрическими жидкостями на основе синтетических и натуральных сложных эфиров. Поскольку синтетические сложные эфиры достаточно дороги для большинства практических приложений, наибольшее распространение получили натуральные сложные эфиры – растительные масла [1].

Основными преимуществами сложных эфиров перед минеральными маслами является их меньшая горючесть, а также более высокая температура воспламенения (~160 °С) [1], что позволяет соблюсти ужесточающиеся нормы по пожарной безопасности без реконструкции подстанций. Кроме того, натуральные эфирные масла обладают высокой биоразлагаемостью, что минимизирует экологическое воздействие на окружающую среду при случайном разливе масла.

С учетом того, что химический состав натуральных эфирных масел имеет существенные отличия от минеральных масел, традиционные критерии диагностики состояния оборудования требуют корректировки, либо вовсе не работают. В данной работе на основе анализа особенностей физико-химических свойств натуральных сложных эфиров предложены варианты определения качества бумажной и масляной изоляции на основе оптических исследований эфирного масла.

По химической структуре растительные масла относятся к жирам, представляющими собой триглицериды – сложные эфиры трехатомного спирта глицерола и трех высокомолекулярных жирных кислот:



Жирные кислоты имеют, как правило, неразветвленную цепь из атомов углерода – радикалы R1, R2, R3. Длина этих цепочек C8–C22, в которых содержится от нуля до трех двойных связей.

Согласно классической теории окисления углеводов в жидкой фазе, наличие двойной связи способствует окисляемости углеводородных цепочек. Таким образом, чем меньше двойных связей будет в молекулах жирных кислот, тем большей стойкостью к окислению будет обладать такое масло. Следует заметить, что в свежих минеральных изоляционных маслах непредельные углеводороды практически отсутствуют.

Сложные эфиры растительного происхождения обладают намного худшей стабильностью к окислению по сравнению с минеральными маслами, что можно объяснить непредельным характером большей части жирных кислот. В основном это моно- (одна двойная связь C=C) и полиненасыщенные жирные кислоты (две и более двойных связи). Насыщенных жирных кислот в растительных маслах относительно невелико. Исходя из этого, очевидно, что чем больше в растительном масле мононенасыщенных жирных кислот, тем более стойким оно будет к окислению.

Из мононенасыщенных кислот в растительных маслах наиболее часто встречается олеиновая кислота. В связи с этим антиокислительную стойкость масел принято оценивать содержанием в них олеиновой кислоты.

Описанный критерий на практике не всегда удобен, особенно для характеристики эксплуатационных масел. Поскольку непредельность молекул жирных кислот, входящих в состав триглицеридов, является основной причиной низкой устойчивости масел к окислению, относительное количество непредельных углеродных цепочек C=C в исследуемом масле является более точным критерием стойкости к окислению эфирного масла. Для определения этого параметра наиболее целесообразно использовать оптические спектральные методы.

На рисунке 1 представлены спектры оптической плотности D в диапазоне 4750...4500 см^{-1} трех образцов растительных масел с сильно различающимся содержанием олеиновой кислоты – льняного, подсолнечного и оливкового. На длине волны 4665 см^{-1} проявляется интенсивный пик поглощения, относящийся комбинации валентных колебаний C=C и =C-H групп. Спектры поглощения были получены с помощью ИК-Фурье спектрометра VERTEX 70 (фирма Bruker). Толщина кюветы 2 мм.

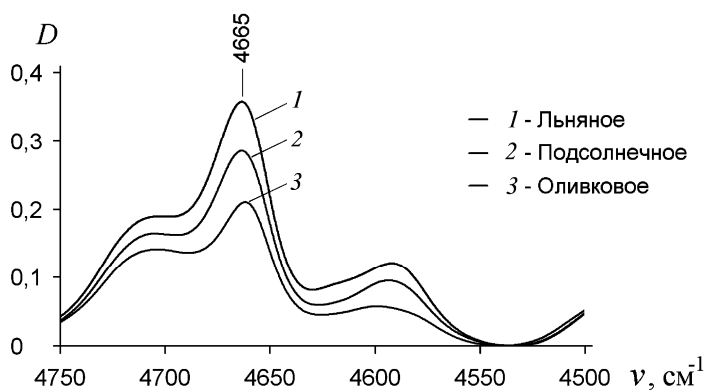


Рис. 1. Сравнение области поглощения непредельных углеводов различных растительных масел

Чем выше интенсивность этой полосы в растительном масле, тем больше непредельных углеводов содержится в составе триглицеридов и, соответственно, ниже стойкость к окислению. Для рассматриваемых образцов интенсивность полосы поглощения около 4665 см^{-1} последовательно убывает в ряду льняное (образец 1), подсолнечное (образец 2), оливковое (образец 3). Следовательно, самая низкая стойкость к окислению соответствует льняному маслу, наибольшая – оливковому.

Полученные результаты полностью соответствуют содержанию олеиновой кислоты в этих маслах: меньше всего ее в льняном масле, наибольшее количество – в оливковом масле.

Следует еще раз подчеркнуть, что предлагаемый спектральный метод является более точным и объективным критерием устойчивости к окислению натуральных сложных эфиров.

В натуральные эфирные масла в обязательном порядке добавляется антиокислительная присадка (ингибитор окисления), как правило, фенольного типа. По мере окисления масла концентрация ингибитора окисления уменьшается, одновременно растет кислотное число масла.

В процессе эксплуатации трансформаторов происходит постепенная деградация и бумажной изоляции, сопровождающаяся гидролизом целлюлозы с выделением воды. Неполярный характер углеводородной основы традиционных минеральных масел препятствует выходу влаги из бумаги. Напротив, полярные молекулы триглицеридов натуральных эфиров способствуют миграции влаги из бумаги в растительное масло. Под влиянием воды происходит разложение эфирных молекул масла с образованием свободных длинноцепочечных жирных кислот. В результате этого растет значение кислотного числа эфирного масла, однако расходование ингибитора окисления не происходит.

Таким образом, контроль концентрации ингибитора окисления в масле и кислотного числа масла позволяет отдельно выявлять процессы деградации бумажной изоляции и окисления натурального эфирного масла.

Оба рассматриваемых параметра можно с высокой точностью определять различными методами оптической спектроскопии [3]. Это позволяет отнести оптический контроль к числу перспективных инструментов диагностики силовых трансформаторов, наполненных диэлектрическими жидкостями на основе натуральных сложных эфиров.

Литература

1. **Moore S.P.** Some Considerations for New and Retrofil Applications of Natural Ester Dielectric Fluids in Medium and Large Power Transformers // Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005/2006 IEEE PES (Dallas, TX, 21 – 24 May 2006). Dallas, 2006. P. 25 – 29.

2. **Moore S., Rapp K., Baldyga R.** Transformer Insulation Dry Out as a Result of Refilling with Natural Ester Fluid // Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2012 IEEE PES (Orlando, Florida, 7 – 10 May 2012). Orlando, 2012. P. 1 – 6.

3. **Гарифуллин М.Ш.** Диагностические исследования изоляционных масел различными методами оптической спектроскопии // Энергетика Татарстана. 2013. № 1. С. 53 – 59.

ДИАГНОСТИКА КАЧЕСТВА КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ОДНООСНОГО СИЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ

Кульков А.А., Будадин О.Н., Каледин В.О.

В настоящее время имеет место ускоренное внедрение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в различные области техники: авиация, космос, трубопроводные системы, ракетостроение и т.п., например, [1]. Преимущества ПКМ перед, например, традиционными металлами заключаются, в частности, в возможности создания сложных пространственных структур с оптимальным соотношением массогабаритных и прочностных характеристик (например, сетчатых конструкций) при относительно низкой трудоемкости.

Большинство конструкций из ПКМ «работает» в условиях силового нагружения. Поэтому актуальна задача оценки их технического состояния (наличие внутренних напряжений, дефектов, нарушение технологии изго-

товления и т.п.) в процессе воздействия на них различных нагрузок (от штатных рабочих нагрузок, до испытательных). В связи с потенциальной опасностью исследования изделий в процессе их силового нагружения метод диагностики должен обладать рядом специфических характеристик: дистанционность регистрации информации, возможность обработки информации в реальном времени испытаний, наглядность, возможность моделирования процесса диагностики – от физических процессов разрушения изделия до получения необходимых информационных признаков качества и т.п.

Одним из перспективных методов такой диагностики является тепловой [2, 3], основанный на анализе динамических температурных полей, образующихся на поверхности контролируемого изделия вследствие физических процессов, происходящих в изделии при его силовом нагружении.

При нагружении композиционных материалов до их разрушения наблюдается накопление локальных микрповреждений, приводящих к необратимым деформациям [4, 5]. Наиболее интенсивно такие повреждения накапливаются в зонах концентрации напряжений. Благодаря этой особенности материала, регистрируя температурные поля нагружаемых образцов и анализируя их термограммы, можно выявить зоны повышенной концентрации напряжений.

Цель настоящей работы – обоснование возможности диагностики технического состояния контроля пространственной конструкции из полимерного композиционного материала в процессе одноосного силового нагружения на основе результатов теплового контроля путем разработки реалогической математической модели, связывающей интенсивность тепловыделения и образования температурного поля на поверхности изделия с параметрами напряженно-деформированного состояния и оценки предполагаемой скорости роста микрповреждений по параметрам температурной аномалии.

Математическая модель строилась на основе результатов экспериментальных исследований процесса выделения тепла и формирования температурного поля изделий при их нагружении. Проведены экспериментальные исследования технологии диагностики и программных средств на натурных конструкциях. Экспериментальные исследования подтвердили выводы теоретических исследований о возможности диагностики технического состояния сложных конструкций из ПКМ по анализу их динамических полей.

На основании проведенных работ сделаны следующие выводы. Признаки наличия концентраторов напряжения в изделии в виде достоверно идентифицируемых температурных аномалий ($\Delta T \geq 1,5^\circ$) фиксируются при деформации не более 55 % от предельной с погрешностью ($\pm 4\%$), что позволяет оценивать качество изделия, не доводя его до разрушения.

Теоретические результаты достаточно хорошо согласуются с измеренными. Это позволяет заключить, что рассчитанные нормальные поля температур могут быть использованы в качестве эталонных при определении зон накопления микроповреждений в элементах конструкций из полимерных композиционных материалов.

Литература

1. **Васильев В.В., Барынин В.А., Разин А.Ф., Петроковский С.А., Халиманович В.И.** Анизотропные композитные сетчатые конструкции – разработка и приложение к космической технике // Композиты и наноструктуры. 2009. № 3. С. 38 – 49.
2. **Будадин О.Н., Вавилов В.П., Абрамова Е.В.** Диагностика безопасности. Тепловой контроль / Под общей редакцией академика РАН Ключева В.В. М.: Издательский дом «Спектр», 2011. 171 с.
3. **Барынин В.А., Будадин О.Н., Кульков А.А.** Современные технологии неразрушающего контроля конструкций из полимерных композиционных материалов. М.: Издательский дом «Спектр», 2013. 243 с.
4. **Справочник** по композиционным материалам: В 2-х кн. Кн. 2 / Дж. Люблин (ред.). М.: Машиностроение, 1988. 584 с.
5. **Завидей В.И., Васенев Ю.Г., Ступаченко С.Л.** Комплексный подход к выявлению дефектов многослойных конструкций из композиционных материалов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.panatest.ru/print?id=COMPOSITE%20MATERIALS&type=static> (дата доступа 29.07.2013)

ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ, КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ

Лушников А.В.

ООО «АЛЬГОЛЬ», г. Калининград, Россия

Контроль параметров воздушной среды является залогом качества технологического процесса или теплового комфорта. Проведение тепловизионного контроля и контроля воздухопроницаемости раскрывает потенциал энергосбережения строительных объектов. Неразрушающий метод измерения расхода воздуха в вентиляционных системах с использованием FlowBlaster до 10 раз увеличивает скорость контроля работы системы. Контроль герметичности вентиляционных систем с использованием DuctBlaster является залогом безопасности и энергосбережения.

МИКРОВОЛНОВЫЙ КОНТРОЛЬ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Матвеев В.И.¹, Пугачев С.В.²

¹ЗАО НИИИИИ МНПО «Спектр»,

²Mapower, Москва, Россия

Радиоволны СВЧ диапазона (microwaves) широко используются для контроля различных процессов, носящих динамический характер – измерения скорости движения и вращения объектов, их смещения, изменения положения, вибраций и т.п., а в последнее время получила развитие биорадиолокация [1, 2]. Известны также работы [3] по микроволновой диагностике плазмы, ее плотности и состояния.

Применение микроволн в данном направлении основано на анализе отраженного излучения по амплитуде, фазе, частоте и поляризации в соответствии с классическими законами электродинамики.

Одним из интересных и важных направлений является использование микроволн для контроля параметров горения, например, твердого топлива. Фронт горения за преградой является отражающим и, следовательно, может быть проконтролирован по скорости и равномерности его смещения.

Горючие составы топлива имеют различную степень поглощения в микроволновом диапазоне радиоволн, поэтому эксперименты проводились в трех точках диапазона в пределах 2...100 ГГц. Была выбрана достаточно чувствительная микроволновая схема на основе волноводного турникетного соединения, рис. 1. Преобразователь прибора размещался на внешней границе образца топлива (со стороны теплозащиты). Динамический процесс горения и, следовательно, изменения расстояния от фронта горения до внешней границы непрерывно записывался, рис. 2, после чего производилась первичная обработка результатов.

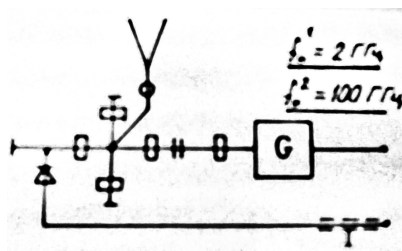


Рис. 1. Схема преобразователя

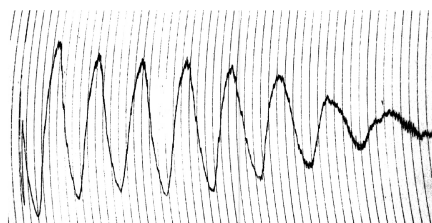


Рис. 2. Запись процесса горения

Расстояние между одноименными экстремумами (максимумами или минимумами) равно половине рабочей длины волны в диэлектрике (топливе). Зная диэлектрическую проницаемость материала топлива и фиксируя время, сравнительно легко определить скорость процесса горения или остаточную толщину топлива после принудительной остановки процесса. Испытания проводились на образцах и реальных конструкциях.

Эксперименты показали неравномерность процесса горения (при некоторых технологиях подготовки смесей) и, с другой стороны, возможность управления процессом при наличии аппаратуры его контроля.

Литература

1. **Ковалев А.В., Матвеев В.И., Федчишин В.Г.** Состояние и развитие микроволновых методов НК и ТД // Контроль. Диагностика. 2009. № 4. С. 65 – 68.
2. **Биорадиолокация:** Коллективная монография / Под ред. А.С. Бугаева, С.И. Ивашова, И.Я. Иммореева. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 396 с.
3. **Голант В.Е.** Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы. М.: Наука, 1968. 327 с.

МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ АТТЕСТАЦИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Махов В.Е., Репин О.С., Потапов А.И.
*Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,
г. Санкт-Петербург, Россия*

Основным вопросом применения оптико-электронных измерительных систем является вопрос калибровки системы, обеспечивающих метрологические характеристики проводимых измерений. Известные эталоны для калибровки оптических систем выполняются в виде штриховых мер с заданными расстояниями между штрихами, обеспечивают процедуру калибровки оптических измерительных систем путем визуального совмещения визира с центром штриха (объект микрометры, окуляр – микрометры). Расстояние между штрихами меры выполняется с высокой точностью, в то время как ширина штриха может иметь значительный допуск. Штрихи эталонов часто выполняются достаточно тонкими, что является специфической особенностью при их регистрации матричными фотоприемниками (повышенное соотношение сигнал/шум).

Исследование высокоточных калибровочных алгоритмов для оптико-электронных измерительных систем позволит применить известную методику метрологической аттестации оптических систем для измерения линейных размеров, которая в свою очередь даст возможность широкому использованию оптико-электронных измерительных систем в промышленном производстве.

Ранее показана эффективность применения методов непрерывного вейвлет преобразования (НВП) для границ теневого изображения с протяженной областью светлого и темного полей [1, 2]. Была рассмотрена возможность калибровка измерительной системы путем использования тестовых объектов. Однако тестовые объекты сами по себе не всегда имеют достаточную точность и не реализуют связь с существующими методиками метрологической аттестации оптических измерений.

Анализ показывает, что вопрос применения алгоритмов, в том числе на базе НВП для измерения расстояния между штрихами меры в изображении с высокой точностью имеет специфические особенности и ранее не рассматривался. Решение задачи метрологической аттестации измерительных оптико-электронных измерительных систем можно считать весьма актуальной.

Целью работы является исследование точности измерения расстояний между штрихами эталонной меры в оптико-электронных системах на базе алгоритмов непрерывного вейвлет преобразования.

Для проведения исследований был разработан исследовательский виртуальный прибор (ВП), который позволял исследовать различные модели профиля распределения освещенности в изображении ряда штрихов, влияния шума, на результат определения координат штрихов, методом НВП, анализа кривых коэффициентов НВП. В качестве тестовых моделей выбирались сигналы, представляющих собой серию прямоугольников с выпуклыми вершинами. На рисунке 1, *a* представлен выборка (256 точек) исходного модельного (1), зашумленного сигнала (2), а также первая производная модельного сигнала (3). На рисунке 1, *b* – график интенсивности НВП для исходного сигнала, на рис. 1, *в* – кривые коэффициентов НВП для исходного (1) и зашумленного сигнала (2). Исследования проводились для различных типов вейвлетов. Вычислительные эксперименты показали, максимумы кривых коэффициентов НВП вейвлета «MtxicanHat» в отсутствии шума точно определяют координаты центра штриха. Этот факт легко объясняется тем, что временной образ вейвлета «MtxicanHat», участвующий в интегральном преобразовании «сдвиг – масштаб», имеет достаточно простую форму (вторая производная от гауссиана), с одной осцилляцией и симметричен. Частотный образ этого вейвлета также оптимален для подавления шума. В то же время, у целого ряда других несимметричных вейвлетов разных типов (db3, db7, bior2_2, bior2_4, bior2_6, bior2_8, bior4_4,

bior5_6, bior6_8, coif N, sym 3, sym 6, sym 8) экстремумы кривых коэффициентов НВП также достаточно хорошо ассоциированы с координатой центра штриха меры.

Для экспериментальной проверки использовался цифровой микроскоп OITEZ DP-M07-200 с разрешением 1600×1200 пкс². В качестве эталонных мер (образцов) была использована измерительная линейка (рис. 2, а) размером 5×5 мм (цена деления линейки составляла 0,2 мм), мира № 1 (рис. 2, б), объект микрометр ОМО (0,001 мм) ГОСТ 7513–55 (рис. 2, в).

Результаты исследований показали совпадение результатов измерений в центральной части изображения штриховых мер с точностью 0,1 пикс. Учитывая высокую точность измерения меры, проведено определение дисторсии по полю изображения для каждого увеличения.

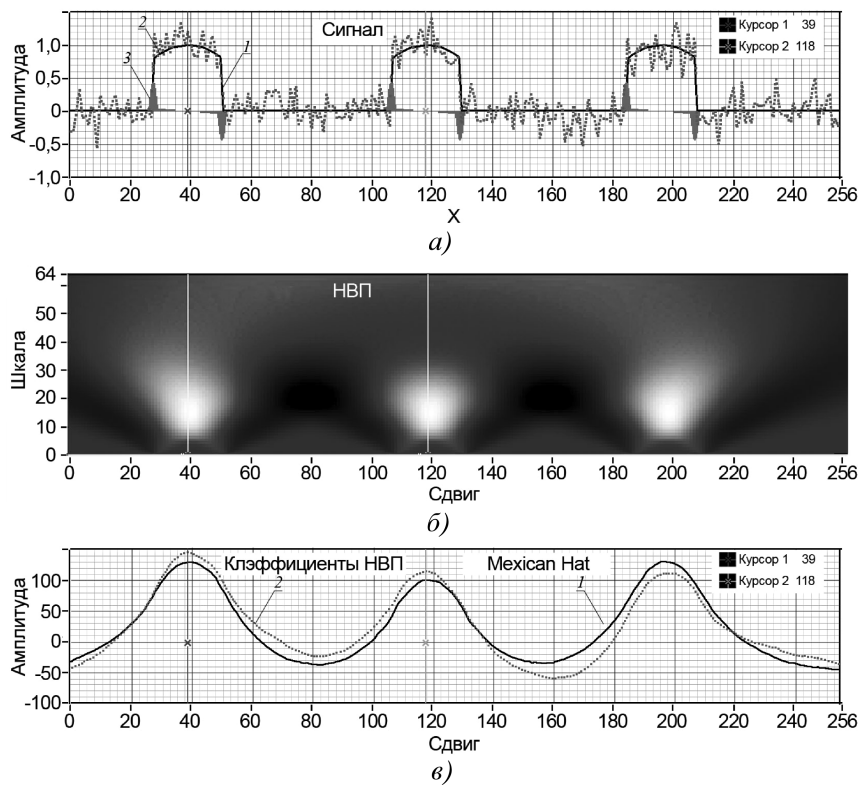


Рис. 1. НВП тестового сигнала:

- а – исходный модельный сигнал без шума (1) с шумом (2), производная сигнала (3);
- б – график интенсивностей НВП сигнала;
- в – кривые коэффициентов НВП сигнала без шума (1) с шумом (2)

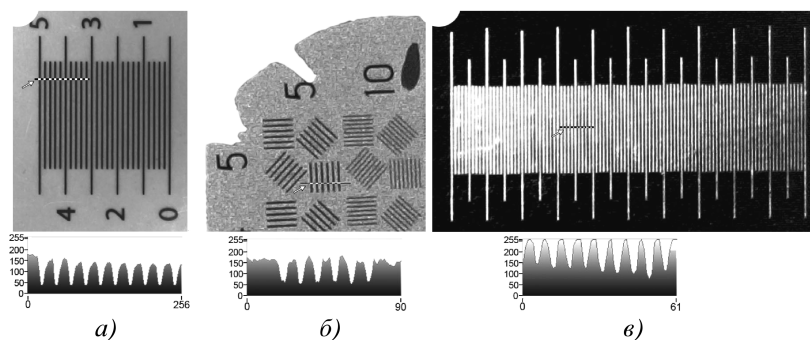


Рис. 2. Изображения эталонных мерных образцов:
а – линейка 5×5 мм, цена деления – 0,2 мм; *б* – мира № 1;
в – объект микрометр 1 мм, цена деления – 0,001 мм

Литература

1. **Махов В.Е., Потапов А.И.** Использование алгоритма непрерывного вейвлет- преобразования в системах технического зрения // Изв. вузов. Приборостроение, 2011. Т. 54, № 9. С. 10 – 15.
2. **Махов В.Е.** Контроль линейных размеров изделий на базе технологий фирмы «NATIONAL INSTRUMENTS» // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 63, № 7. С. 54 – 60.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ УГЛЕПЛАСТИКИ С ИНТЕГРИРОВАННЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ СЕНСОРАМИ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПРЕДДЕФЕКТНОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА

Мурашов В.В., Сорокин К.В.
ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, Москва, Россия

Устоявшееся в настоящее время понятие «интеллектуальные» или «умные» материалы является условным и применяется скорее для краткости. Обычно под интеллектуальным материалом подразумевают материал с встроенными в него системами контроля за его напряженно-деформационным состоянием и различными физико-механическими характеристиками.

Важным достижением материаловедения XX века является разработка полимерных композиционных материалов (ПКМ): угле-, органо-, стекло-

пластиков и других высокопрочных ПКМ, позволивших решить проблему создания легких высоконагруженных конструкций авиационной, космической и других отраслей промышленности. Следующий шаг в развитии материаловедения – создание интеллектуальных композитов – материалов, которые помимо основных функций (быть конструкционными материалами), способны контролировать в процессе эксплуатации техническое состояние конструкции, изменять при необходимости ее жесткость или геометрию, осуществлять саморемонт и выполнять другие функции.

Конструкционные ПКМ отличаются своим малым весом, высокими прочностными характеристиками, коррозионной стойкостью и долговечностью эксплуатации конструкций, выполненных из них. Одно из перспективных направлений развития ПКМ – это наделение их специальными свойствами, позволяющими осуществлять перераспределение действующих нагрузок на конструкцию, компенсировать их воздействие, изменять геометрические характеристики конструкции и определять собственные физико-механические параметры.

Интеллектуальные материалы способны выполнять свои функции в ответ на изменение параметров окружающей среды и использовать вложенные при изготовлении изделий сенсорные способности для контроля качества материала. Самодиагностика, самоадаптация, саморемонт и самоуничтожение – вот некоторые функции, которые могут быть интегрированы в высокоструктурированных интеллектуальных материалах. Проблема интеллектуальных материалов требует решения широкого спектра вопросов, являющихся не только материаловедческими, но и вопросами неразрушающего контроля, конструирования, приборостроения, информатики и т.д.

Встроенный контроль позволяет регистрировать величину приложенных нагрузок, момент возникновения и последующее развитие дефекта в конструкциях в процессе эксплуатации авиационной техники. Встроенный контроль, включает в себя датчики (сенсорные элементы) и систему сбора и обработки информации с датчиков, которая позволяет получить данные о текущем состоянии труднодоступных и высоконагруженных мест на летательном аппарате, спрогнозировать остаток ресурса конструкции и предупредить о возможном разрушении материала конструкции.

Для того чтобы материал мог называться интеллектуальным, он должен реагировать на внешние воздействия, что невозможно без создания «нервной» системы материала которую можно реализовать с помощью сенсорных элементов. Одними из видов перспективных сенсорных элементов являются волоконно-оптические датчики физических величин на основе решеток показателя преломления. Датчики деформаций могут так же выполнять роль датчиков температуры.

В качестве датчиков (сенсорных элементов) в системах встроенного контроля могут быть использованы электрические, пьезоэлектрические, акустические, тепловые, электромагнитные и другие датчики, закрепляе-

мые в различных точках на поверхности контролируемой конструкции, а также датчики, внедренные в материал, из которого изготавливалась контролируемая конструкция. Контроль с помощью закрепляемых на поверхности конструкции датчиков имеет существенные недостатки, которые связаны с такими факторами, как наличие высокого уровня шумов и вибраций во время полета, сильных электромагнитных полей, а также влияния на результаты контроля качества крепления датчиков. Поэтому основное внимание в ВИАМе было уделено развитию сенсорных элементов, внедренных в материал контролируемой конструкции, имеющих существенные преимущества перед накладными датчиками. В этом случае можно избавиться от необходимости крепления датчиков и практически снимается вопрос зависимость сигнала датчика от электромагнитных полей, шумов и вибраций.

Применение интеллектуальных материалов может найти применение в строительстве зданий в сейсмически опасных регионах, энергетике и энергетических сооружений, кораблестроении, авиации и космической отрасли. Материалы, обладающие описанными выше свойствами, являются инструментом, грамотное применение которого современными инженерными науками, позволит снизить массогабаритные характеристики конструкций и повысить безопасность эксплуатации конструкций из композиционных композиционных материалов.

Одной из важных задач для повышения безопасности конструкций из ПКМ является прогнозирование развития дефектов и их своевременное выявление. Для выявления дефектов в ПКМ чаще всего применяется ультразвуковая дефектоскопия. Тем не менее, ультразвуковые методы исследований хотя и позволяют определять наличие даже микродефектов, но не могут информировать о возможности образования дефектов [1]. Для прогнозирования развития дефектов часто применяются различные статистические методы и методы экспертных оценок, но все эти методы не являются точными и носят субъективный характер.

В ВИАМе работа по созданию сенсорных элементов ведется по трем направлениям:

- сенсоры на основе оптических волокон с нанесенными волоконными брэгговскими решетками (ВБР) в структуре;
- системы актюирования на основе пьезокерамики (цирконата-титаната свинца);
- емкостные сенсоры, соединенные с индуктивностью в колебательный контур.

Применение в качестве систем актюирования встраиваемых в структуру композиционного материала пьезоэлектрической керамики связано с использованием пьезоэлектрического эффекта, причем наличие прямого и обратного пьезоэффектов обеспечивает значительные преимущества пьезоэлектрических компонентов при создании интеллектуальных материалов. В составе интеллектуального материала они могут выполнять функции

сенсоров и активных элементов, управляющих напряженным состоянием материала.

Одним из параметров, который может характеризовать состояние материала, в том числе и преддефектное состояние, является его жесткость [2]. Для имитации изменения жесткости конструкции были изготовлены образцы из ПКМ на основе углеродного наполнителя с интегрированными пьезоактуаторными элементами и датчиками на основе ВБР. Определение изменения жесткости производилось расчетным путем, исходя из измеренных значений отклонения образца от исходного положения, и исходя из изменения значения его деформации, зарегистрированной волоконно-оптическим датчиком на основе ВБР. Предложенный способ диагностики позволяет определить изменение жесткости образцов. В свою очередь изменение жесткости конструкций из ПКМ может служить индикатором наличия структурных изменений и, как следствие, образования дефектов.

В ВИАМ разработан сенсорный элемент на основе ВБР, который полностью удовлетворяет требованиям применения и может быть использован для построения систем контроля напряженно-деформационного состояния конструкций из ПКМ. Разработанный ВБР-датчик, обладает высокой чувствительностью и линейностью и адекватно отражает механическую деформацию ПКМ, обеспечивая высокую долговременную стабильность показаний и хорошую линейность отклика.

Температурная чувствительность ВБР в материале практически соответствует температурной чувствительности свободной ВБР. следовательно, дополнительных деформаций ВБР, вызванных несовпадением коэффициентов теплового расширения КМ и материала ВС не наблюдается. Это позволяет использовать хорошо исследованные температурные характеристики ВБР как для компенсации и учета тепловых воздействий, так и для построения систем измерения температуры, или систем комбинированного типа.

Разработанный и сконструированный действующий макет устройства регистрации позволяет надежно регистрировать сигнал, обрабатывать и отображать в удобной для восприятия форме показания ВБР-датчика деформационно-напряженного состояния ПКМ.

Литература

1. **Мурашов В.В.** Определение физико-механических характеристик и состава полимерных композиционных материалов акустическими методами // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 465 – 475.
2. **Сорокин К.В., Мурашов В.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А.** Прогнозирование развития дефектов в конструкциях из ПКМ способом определения изменений жесткости при актуировании материала // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. № 2. С. 20 – 22.

ОПТОВОЛОКОННЫЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРЫ И ДЕФОРМАЦИИ РЕЗЕРВУАРА

Науменко А.П.¹, Бойченко С.Н.¹, Тарасов Е.В.¹, Заренбин А.В.²

¹НПЦ «Динамика», г. Омск, Россия,
²«НЦВО – Фотоника», Москва, Россия

Неразрушающий контроль и техническая диагностика колонно-емкостного оборудования (реактора, колонны, резервуары и т.д.) нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств в процессе эксплуатации на технологическом режиме является важной задачей, решение которой позволяет обеспечить надежность и безопасность взрывопожароопасных производств. В системах компьютерного мониторинга и автоматической диагностики КОМПАКС[®] применяются практически все виды неразрушающего контроля: вибрационный, акустико-эмиссионный, тепловой, электрический, вихретоковый, акустический, волоконно-оптический. Принципы построения системы КОМПАКС[®] позволяют обеспечить гибкость и универсальность применяемых методов НК. Система КОМПАКС[®] обеспечивает получение данных с датчиков различных физических величин и автоматическая экспертная система без участия человека выполняет анализ состояния объекта. В настоящее время НПЦ «Динамика» в сотрудничестве с «НЦВО – Фотоника» решена задача по обеспечению контроля системами КОМПАКС с помощью волоконной оптики. В настоящей статье рассмотрены вопросы применения технологии волоконной оптики в системах КОМПАКС[®] для обеспечения неразрушающего контроля и технической диагностики колонно-емкостного оборудования в эксплуатации.

Применение волоконно-оптических телеметрических подсистем в системах КОМПАКС[®] обеспечивают получение информации по температуре и деформации для мониторинга технического состояния по одному волоконному кабелю, чем минимизированы затраты на строительство эстакад и обвязку резервуаров.

Сертификация применения во взрывоопасных зонах волоконно-оптических телеметрических подсистем в составе систем КОМПАКС[®], позволяет использовать технологию волоконной оптики для обеспечения неразрушающего контроля и мониторинга технического состояния колонно-емкостного оборудования в эксплуатации.

Применение оптоволоконных датчиков деформации и температуры на технологическом оборудовании с различной температурой стенки от –50 до +500 °С позволяет на рабочем режиме получать данные по изменению напряженно-деформированного состояния материала, контролировать стабильность ведения технологического процесса и обеспечивать предупреждение персонала при возникновении трещинообразования.

Литература

1. **Костюков В.Н.** Мониторинг безопасности производства. М.: Машиностроение, 2002. 224 с.
2. **Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Костюков А.В.** Автоматизированные системы управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств (АСУ БЭР – КОМПАКС®) / Под ред. В.Н. Костюкова. М.: Машиностроение, 1999. 163 с.
3. **Симонов М.А, Заренбин А.В.** Волоконно-оптический датчик для измерения температуры в сухих и маслонаполненных трансформаторных реакторах // Materiály IX mezinárodní vědecko – praktická konference «Moderní vymoženosti vědy – 2013». – Díl 76. Technické vědy: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o – 96 stran. P. 54 – 57.
4. **Пат.** на полезную модель № 77420. Универсальный волоконно-оптический модульный телеметрический комплекс, регистрирующий модуль, сенсорная головка и модуль расширения числа оптических каналов / Заренбин А.В., Греков М.В., Васильев С.А., Медведков О.И. // Опубликовано: 20.10.2008. Бюл. № 29.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОВМЕСТНОГО ПРОВЕДЕНИЯ ТЕПЛОВИЗИОННОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ СОВМЕСТНО С ИЗМЕРЕНИЕМ ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТИ МЕТОДОМ BLOWER DOOR (АЭРОДВЕРЬ) ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ И КАЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ЦЕЛОСТНОСТИ ВОЗДУШНОГО БАРЬЕРА ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ

Нитиевский А.А.
Рига, Латвия

Усиление требований к энергоэффективности зданий и сооружений заставляет обратить особое внимание на те характеристики, которые в общей картине потребления энергоресурсов были ранее не так значимы. В настоящее время особое внимание уделяется такому важному параметру ограждающей конструкции (ОК) как герметичность или воздухопроницаемость.

Проведение тепловизионного обследования совместно с тестом на воздухопроницаемость ОК здания соответствует требованиям международных стандартов по тепловизионному обследованию (EN13187) и позволяет гарантированно выявлять дефекты, причиной которых является нару-

шение воздушного барьера. В то же время результаты измерения воздухопроницаемости с помощью Аэродвери (Blower Door) позволяют сделать количественный анализ и оценить ОК здания на соответствие существующим строительным нормативам по воздухопроницаемости (СНиП 23-02). Тепловизионный контроль совместно с измерением воздухопроницаемости ОК на этапе строительства и эксплуатации позволяет обеспечить выполнение расчетных параметров потребления энергоресурсов и выявить строительные дефекты на раннем этапе.

В докладе рассмотрены отечественные и зарубежные стандарты, методика проведения обследования, примеры тепловизионной съемки совместно с Аэродверью (Blower Door) и применяемое оборудование.

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ КОНВЕРТЕР МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ИНФРАКРАСНОЕ НА ОСНОВЕ МЕТАМАТЕРИАЛА ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАТОРА ММ ИЗЛУЧЕНИЯ

Паулиш А.Г.¹, Загубисало П.С.¹, Кузнецов С.А.^{1,2}, Федоринин В.Н.¹

¹*Филиал Института физики полупроводников СО РАН*

*«Конструкторско-технологический институт
прикладной микроэлектроники», г. Новосибирск, Россия,*

²*Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия*

Введение

В последнее время ведутся интенсивные исследования в области миллиметровых длин волн электромагнитного излучения. Данный диапазон соответствует суб-терагерцовым частотам и рассматривается перспективным в различных применениях, таких как системы безопасности, неинвазивная био-медицинская диагностика, неразрушающий контроль строительных конструкций. В предыдущих работах [1 – 4] нами был предложен, разработан и исследован конвертер ММ излучения в инфракрасное излучение на основе метаматериала с искусственно заданными диэлектрическими свойствами. ММ-ИК конвертер представляет собой многослойную структуру, состоящую из ультратонкого резонансного поглотителя ММ излучения и высокоэффективного эмиссионного слоя с коэффициентом черноты, близким к единице. Поглотитель, в свою очередь, состоит из свободновисящей диэлектрической пленки толщиной d много меньше рабочей длины волны λ ($\lambda/d \sim 150$), которая металлизирована с двух сторон. С одной сто-

роны методом контактной фотолитографии изготовлен микрорисунок специальной формы. Данная структура использовалась как частотно-избирательная поверхность, обеспечивающая поглощение ММ излучение на заданной длине волны. Резонансная частота и полоса поглощения задаются геометрическими параметрами металлизированного микрорисунка. Конвертер работает следующим образом. Поглощение ММ излучения приводит к нагреву поглотителя, что, в свою очередь, приводит к увеличению интенсивности ИК излучения со стороны эмиссионного слоя, которое регистрируется высокоэффективной ИК камерой.

В данной работе предлагается система визуализации ММ излучения, основанная на ММ-ИК конвертере и ИК камере, приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования данной системы. Данная система рассматривается как достаточно простое техническое решение, обладающее гибкостью по отношению к выбору рабочей частоты и выбору конструкции, в зависимости от задачи визуализатора. Данная система не имеет ограничений на поперечный размер конвертера, что весьма важно для получения качественного изображения с длиной волны порядка миллиметра.

Результаты и обсуждение

Визуализатор состоит из объектива, формирующего изображение в ММ диапазоне длин волн в плоскости поглощающей поверхности конвертера, собственно конвертера, ИК объектива, переносящего тепловое изображение эмиссионного слоя в плоскость ИК матрицы, ИК камеры с температурным разрешением 40 мК. В данной схеме параметры визуализатора определяются параметрами ИК камеры и тепловыми процессами в ММ-ИК конвертере. Поэтому, для определения параметров конвертера была построена численная модель с использованием пакета COMSOL Multiphysics™, позволяющая моделировать теплофизические процессы в конвертере при облучении его ММ излучением [5].

Моделирование показало, что время отклика температуры конвертера при облучении ММ излучением является линейной функцией толщины конвертера. Плотность мощности, эквивалентная шуму, линейно уменьшается с толщиной конвертера до толщины 5 мкм и постепенно насыщается при меньших толщинах. Для толщины конвертера 3 мкм эквивалентная шуму плотность мощности составляет 0,25 Вт/м², что соответствует $NEP = 5,6 \times 10^{-11}$ Вт/пиксель для современных болометрических детекторов с размером пикселя 15×15 мкм². Моделирование показало, что эффективность конверсии энергии ММ излучения в энергию теплового излучения составляет более 90 %, что обеспечивает высокую чувствительность детек-

тора, сравнимую с современными болометрическими детекторами. Величина изменения температуры конвертера под действием ММ излучения является линейной функцией мощности падающего излучения в диапазоне трех порядков. Режим реального времени обеспечивается при толщине конвертера не более 3 микрон. Эффект расплывания теплового изображения за счет латеральной теплопроводности так же изучался и предложены пути уменьшения его влияния.

Результаты моделирования позволили нам оптимизировать конструкцию визуализатора. На рисунке 1 слева показано изображение пучка излучения с длиной волны 1,5 мм, диаметром 30 мм и суммарной мощностью 4,9 мВт. На рисунке 1 справа показано тепловое изображение конвертера, освещенного излучением с длиной волны 1,5 мм через крестообразную мишу с длиной креста 15 мм и шириной 3 мм. Изображение приведено для оценки пространственного разрешения, которое соответствует дифракционному ограничению. Общий вид визуализатора показан на рис. 1 внизу.

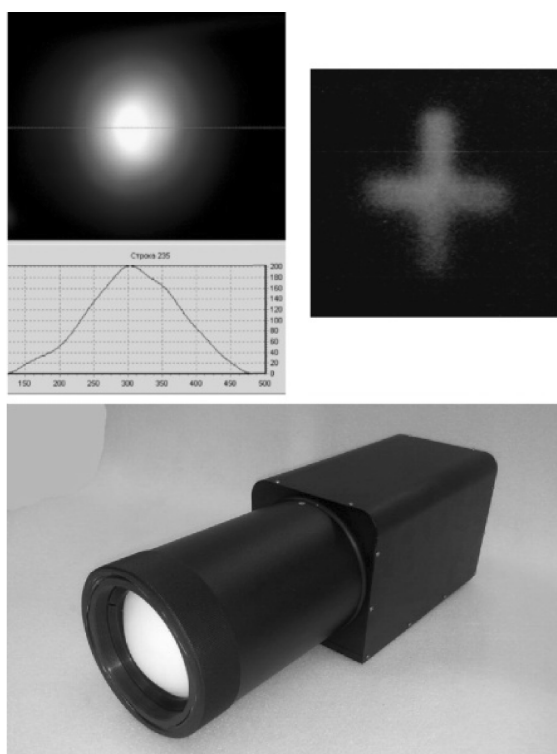


Рис. 1

Литература

1. Пат. РФ № 2447574. Преобразователь терагерцового излучения (варианты) / А.Г. Паулиш, В.Н. Федоринин, А.В. Гельфанд, П.А. Лазорский, С.А. Кузнецов. От 16.11.2010.
2. Пат. РФ № 22482527. Матричный преобразователь терагерцового излучения (варианты) / А.Г. Паулиш, В.Н. Федоринин, А.В. Гельфанд, С.А. Кузнецов. От 24.08.2011.
3. **Bolometric** THz-to-IR Converter for Terahertz Imaging / S.A. Kuznetsov, A.G. Paulish, A.V. Gelfand, P.A. Lazorskiy, V.N. Fedorinin // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 99. 023501(3 p).
4. **Matrix** Structure of Metamaterial Absorbers for Multispectral Terahertz Imaging / S.A. Kuznetsov, A.G. Paulish, A.V. Gelfand, P.A. Lazorskiy, V.N. Fedorinin // Progress In Electromagnetics Research. 2012. Vol. 122. P. 93 – 103.
5. **Моделирование** теплофизических процессов в визуализаторе суб-терагерцового излучения, основанном на тонкопленочном конвертере из метаматериала / А.Г. Паулиш, П.С. Загубисало, С.А. Кузнецов, А.В. Аржанников, М.К. А. Тумм // Известия вузов. Радиофизика. 2013. Т. LVI, № 1. С. 22 – 38.

НЕОБХОДИМОСТЬ МОНИТОРИНГА АППАРАТОВ КОЛОННОГО ТИПА В НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ТЕПЛОВИЗИОННЫМ МЕТОДОМ

Петров К.В.

ООО «Техническая диагностика», г. Уфа, Россия

Мониторинг аппаратов колонного типа нефтеперерабатывающего производства с применением тепловизоров с высоким качеством изображения.

Оценка риска предприятий переработки нефти и нефтепродуктов включает исследование опасностей технологических установок при возникновении аварийных ситуаций и определение возможных последствий в целях разработки необходимых мер по управлению риском (выработка плана действий при аварийных ситуациях, организационно-технических мероприятий по уменьшению вероятностей аварий и последствий от них).

Для количественной оценки риска необходим сбор и анализ информации, характеризующей не только и не столько последствия аварий, но и, в первую очередь, предупреждающей о зарождении и развитии несоответствий и дефектов, следствием которых может стать инцидент или авария.

Кроме того, требуются данные о надежности, работоспособности технических устройств именно в процессе эксплуатации. Согласно статистическим данным по отказам технологического оборудования процент аварий емкостных аппаратов составляет около 15 %. В условиях непрерывности цикла переработки нефти и нефтепродуктов одним из этапов, предшествующих разработке матрицы рисков предлагается тепловизионный контроль 100 % поверхности сосудов, работающих под давлением, в том числе: аппаратов колонного типа.

Развитие мониторинга состояния оборудования основных производств нефтеперерабатывающей промышленности связаны, в том числе, с применением современных средств тепловизионного контроля. В настоящее время качественные термограммы с сопутствующим фото и видео материалом, с речевыми комментариями выполняются на тепловизорах типа FLIR T620 / T640 или NEC H2640.

Результаты тепловизионного обследования показывают наличие неоднородностей температурного поля на отдельных участках наружной металлической поверхности обечаек обследуемого оборудования. В процессе тепловизионного обследования колонн и реакторов установок переработки нефти в рабочем состоянии с целью проверки соблюдения установленных режимов в процессе эксплуатации, а также определения потенциальных участков, ремонт которых может и должен быть запланирован заранее, выявляются повреждения (обрушения) внутренней футеровки, нарушения лакирующего слоя, выявлены предпосылки обнаружения локальных зон утонения стенки аппарата.

При обследованиях наибольшие критические температуры наблюдаются на поверхности реакторов и колонн, что характерно для дефектных участков футеровки. Горячие аномальные зоны связаны с нарушением целостности внутреннего защитного слоя (футеровки) обечайки. Предположительно, это – отслоение футеровки от обечайки, трещины с частичным раскрытием, газопроницаемость. В процессе серии обследований выявлены:

- реактор – в нижней конусной части температура наружной поверхности достигает 338 °С (сторона сканирования условно «юг»), и 454 °С (сторона сканирования условно «север»); расчетная температура стенки реактора не должна превышать 300 °С;

- колонна аппарата – максимально измеренная температура составляет 383 °С в месте приварки штуцера выхода паров из реактора (сторона сканирования условно «юг»); расчетная температура стенки колонны – 360 °С.

Проектное и фактическое положение датчиков контактного типа измерения температуры наружной поверхности корпусов колонн и реакторов имеет локальный характер, устанавливаются они, как правило, в карманах термоизмерений по одной линии. Вследствие этого измеренные характери-

стики не дают полной достоверной картины распределения температурного поля; оперативный персонал своевременно не получает информации о нарушениях, связанных с деструктивными изменениями во внутренних оболочках футеровки и плакирующего слоя.

Использование тепловизионного мониторинга аппаратов колонного типа в реальном времени ограничено условиями эксплуатации трубопроводной обвязки, расположением вблизи обследуемого устройства прочих сосудов и аппаратов с постоянными и циклическими высокими температурами, а также наличием в зоне контроля химически активных паров перерабатываемых сред. В связи с этим, выполнение периодического, не менее одного раза в месяц, тепловизионного контроля является одним из методов, применение которого для получения информации о состоянии практически всей поверхности объекта контроля возможно и с технической точки зрения, и из условия выполнения требований нормативов по охране труда и техники безопасности, а также позволяет выполнять процедуры контроля без трудоемкого процесса демонтажа наружной тепловой изоляции.

Результатом работ является опыт выявления дефектов аппаратов колонного типа, определение текущего технического состояния ответственных элементов термонагруженных аппаратов переработки нефти, своевременная подготовка к ремонтной кампании по устранению дефектов, выявленных в процессе эксплуатации, на рабочем режиме установки, что позволяет осуществлять планирование ремонтного сетевого графика с минимальными сроками выполнения работ, обеспечивается комплексная конструктивная безопасность сложной установки в целом.

Результаты тепловизионного обследования использованы при разработке матрицы рисков нефтеперерабатывающего предприятия, эксплуатирующего аппараты колонного типа и сосуды, работающие под давлением.

Литература

1. **РД 13-04-2006.** Методические рекомендации о порядке проведения теплового контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах (утверждены Приказом ФСЭТАН от 13.12.2006. № 1072).
2. **РД 153-34.0-20.364-00.** Методика инфракрасной диагностики тепломеханического оборудования. М.: ОРГРЭС, 2000.
3. **ГОСТ Р 53778-2010.** Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.
4. **ГОСТ Р 54852-2011.** Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИНФРАКРАСНЫХ МЕТОДОВ НК И КОНТАКТНЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Сергеев С.С.

ООО «ТЕХНО-АС», г. Коломна, Московская обл., Россия

Задача контроля температуры поверхности тел в области температур окружающей среды получила в последнее десятилетие взрывной импульс. Это прежде всего связано с задачами энергетических обследований и с экспоненциальным развитием производства пирометрического (оптических термометров) и тепловизионного оборудования. Однако в данной области имеется ряд не решенных проблем, вызывающих трудности в получении достоверных данных в результате проведения измерений. Проблемы есть как в области метрологического обеспечения, так и в методическом плане, а так же на приборном уровне.

Основными факторами, вносящими погрешности в измерения, выполняемые тепловизорами и пирометрами, являются ошибки в данных о значении коэффициента теплового излучения и величине сторонней (фоновой) засветки. При контактных измерениях отклонения в результатах измерений возникают в результате искажения температуры поверхности самим зондом, вследствие теплообмена. Кроме этого, при контактных измерениях конструкция самого зонда, а также свойства контролируемого материала, такие как теплопроводность, также влияют на результаты измерений.

Решения данных проблем возможны за счет изменения методического подхода, аппаратных решений, и создания новых измерительных приборов.

Снижение влияния коэффициента теплового излучения достигается за счет применения разработанных ООО «ТЕХНО-АС» многоспектральных (2-х, 3-х спектральных) пирометров (оптических термометров).

На предприятии разработан метод комплексного контроля температуры поверхности контактными термометрами, использующий многодатчиковый метод, позволяющий значительно повысить точность измерений температуры поверхности тел.

ПИРОМЕТР ИЛИ ОПТИЧЕСКИЙ ТЕРМОМЕТР. ВОПРОСЫ ТЕРМИНОЛОГИИ

Сергеев С.С.

ООО «ТЕХНО-АС», г. Коломна, Московская обл., Россия

Народности, которые потеряли свой язык, со временем исчезли. Это относится и к областям знаний. В настоящее время все актуальнее встает вопрос об изменении терминологии в области теплового неразрушающего

контроля. Пирометрами уже измеряют температуру не только раскаленных на огне тел, но и жидкого азота, появилось большое количество медицинских и бытовых пирометров (оптических термометров). В связи с завершением согласования международных стандартов в области бесконтактных измерений температуры (МЭК), планируется изменение отечественных стандартов. Поэтому актуальность данного вопроса возрастает.

Проведено обоснование выбора новых терминов. Представлены основные термины.

Термометры излучения – (используемые названия – радиационные термометры) средство (совокупность средств) измерения температуры по электромагнитному излучению в спектральном диапазоне 0,01 нм – 100 см. Комментарий: относятся в соответствии с ГОСТ 8.558–93 тепловизоры, оптические термометры (пирометры), радиопирометры.

Оптические термометры – (используемые названия – пирометры, радиационные пирометры, радиационные термометры, бесконтактные термометры, пирометры излучения, термометры излучения, инфракрасные термометры, дистанционные термометры, оптические пирометры, инфракрасные пирометры) средство (совокупность средств) измерения температуры по тепловому электромагнитному излучению в оптической области спектра.

Оптические термометры полного излучения – (используемые названия – пирометры полного излучения, радиационные пирометры) определение соответствует ГОСТ 28243–96 термину «пирометр полного излучения».

Оптические термометры частичного излучения – (используемые названия – пирометры частичного излучения; дополнительно включенные автором в данную группу – яркостные пирометры, монохроматические пирометры) определение соответствует ГОСТ 28243–96 термину «пирометр частичного излучения».

Оптические термометры спектрального отношения – (используемые названия – пирометры спектрального отношения, цветные пирометры, двухцветные пирометры) оптический термометр, действие которого основано на зависимости отношения энергетических яркостей в двух спектральных интервалах от температуры.

2-х, 3-х, 4-х, 5-и, 6-и волновые оптические термометры – оптические термометры, действие которых основано на зависимости энергетических яркостей соответственно 2-х, 3-х, 4-х, 5-и, 6-и эффективных длин волн.

Многоволновые оптические термометры – оптические термометры, действие которых основано на зависимости энергетических яркостей более чем на 6-и значениях эффективных длин волн.

Коэффициент излучения – (используемые названия – коэффициент теплового излучения, степень черноты, коэффициент черноты, излучательная способность) отношение энергетической яркости контролируемого объекта к энергетической яркости абсолютно-черного тела при одинаковой их температуре.

ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПРИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБСЛЕДОВАНИЯХ МНОГОКВАРТИРНЫХ ЖИЛЫХ ДОМОВ

Троицкий-Марков Т.Е.

*Технологический институт энергетических обследований,
диагностики и неразрушающего контроля «ВЕМО»*

В части анализа современного состояния и развития методов ТНК в РФ можно констатировать:

– российской школой решены базовые фундаментальные, прикладные, научные, методические и программно-аппаратные задачи ТНК и основной упор делается на решение задач моделирования теплового метода контроля применительно к конкретным практическим задачам для принятия дальнейших управленческих решений по модернизации, капитальному ремонту или полной замене объектов техносферы;

– российские компании, выпускающие оборудование для ТНК, близки или даже превышают в уровне технологической части контроля зарубежные аналоги, однако значительно уступают в количестве и качестве выпускаемого оборудования.

Компания FLIR (США) была и остается лидером в производстве ИК камер с вертикально интегрированной бизнес-моделью (собственное производство детекторов) и присутствием на всех рынках. Это господство будет оспариваться на двух уровнях в будущем:

- На уровне камеры: камеры производителей, специализирующихся на каждом рынке имеют сильные распределительные сети и присутствие на рынке (немецкая фирма «Тесто», японская «NEC», американская «FLUCK»).

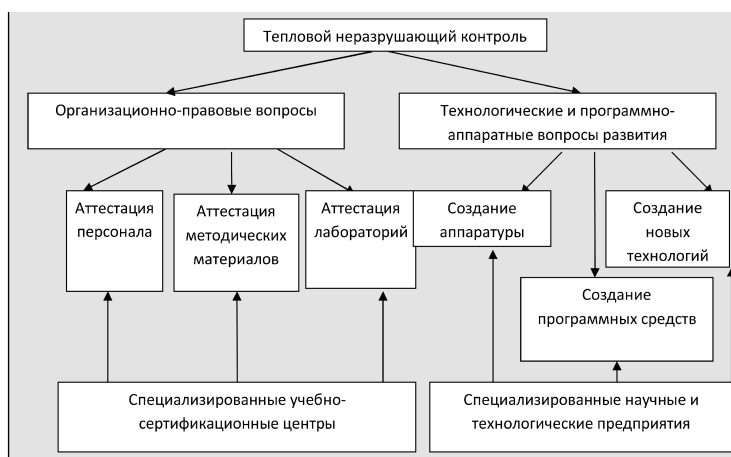


Рис. 1. Схема развития теплового неразрушающего контроля в России

- На уровне детектора: на рынке появятся новые поставщики детекторов из сегмента MEMS и полупроводниковой промышленности с возможностью выпуска продуктов с низкой стоимостью / большим объемом (Sensoror, Bosch, Faun-Infrared ...):

- анализ развития методов контроля, представленный Международным комитетом по неразрушающему контролю (ICNDT), подчеркивает что, основное развитие ТНК осуществляется в основном за счет развития технологической и методической компоненты;

- для успешной реализации государственных программ в рамках распоряжения Правительства РФ от 11.11.2010 г. № 1950-р до 2020 г. и расширения области применения методов ТНК потребуются разработка большого количества программно-аппаратных комплексов для массового использования ТНК в системах технического обслуживания, управления технологическими процессами, диагностики и мониторинга в том числе технических рисков, надзорных и др. функциях обеспечивающих надежность, безопасность и энергоэффективность объектов техносферы.

Исходя из индекса цитирования, представленного на www.google.com тепловой метод контроля (ТНК) является наиболее употребительным и цитируемым более чем на порядок опережая прочие методы.

Объем продаж тепловизионной техники в мире утроится к 2017 г. с более чем 320 тыс. камер, проданных в 2011 г. до более чем 1,1 млн. единиц, т.е. это составит +57 % роста в год согласно прогнозу **Research and Markets**¹.

Емкость рынка всех приборных комплексов НК в США оценивается по состоянию в 2010 г. – 2,6 млрд. дол. в год, (по прогнозу BCC Research) и снижение в дальнейшем не прогнозируется², упор делается на развитие рынка в секторах промышленности, генерации энергии и ЖКХ (рис. 2).

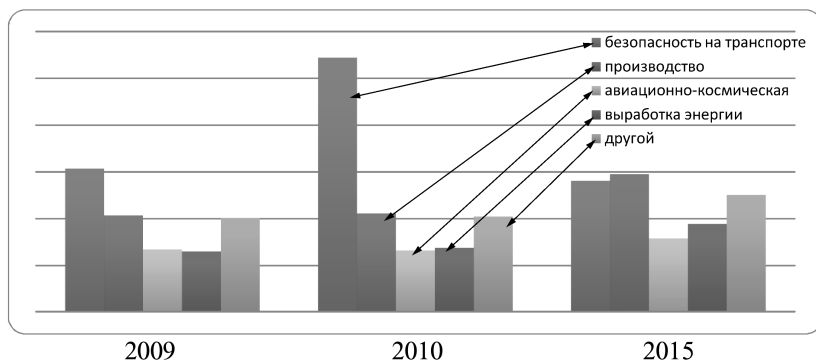


Рис. 2

¹ <http://www.businesswire.com/news/home/20121017005633/en/Research-Markets-Uncooled-Infrared-Imaging-Commercial-Military>

² <http://www.bccresearch.com/report/nondestructive-testing-mfg016f.html>

Потребность российского рынка средств НК к 2015 г. можно оценить в базовом сценарии развития 21,4 млрд. р. Объемы рынка диагностических и экспертных услуг с применением инструментальных методов – выше более чем на порядок!

Следует отметить, все повышающуюся востребованность в России комплексных методов экспресс-диагностики и интенсивное развитие таких методов НК, которые способны эффективно интегрироваться с другими методами НК.

В качестве индикативных показателей успешной реализации методов НК на территории РФ следует рассматривать:

- Снижение аварийности на объектах техносферы до заданного уровня.

- Снижение энергоемкости ВВП России к 2020 г. не менее чем на 40 % по сравнению с 2007 г. (указ Президента Российской Федерации от 4.06.08 № 889 «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики»).

- Обеспеченность технологическими и аппаратными средствами экспресс-диагностики, необходимыми и достаточными для реализации следующих Государственных программ РФ (согласно перечню государственных программ в рамках распоряжения Правительства РФ от 11.11.2010 № 1950-р).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ АКТИВНОЙ СИСТЕМЫ РАДИОВИДЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Шашкин В.И.¹, Белов Ю.И.², Волков П.В.¹,
Горюнов А.В.¹, Илларионов И.А.¹, Серкин А.Г.²

¹*Институт Физики Микроструктур РАН, г. Нижний Новгород, Россия,*

²*Научно-исследовательский радиофизический институт,
г. Нижний Новгород, Россия*

Условия распространения радиоволн миллиметрового диапазона в естественных и искусственных средах позволяют проектировать и создавать пассивные и активные системы радиовидения, адаптированные к различным прикладным проблемам, таким как антитеррористическая деятельность, промышленная интроскопия, медицинская диагностика. Обнаружение и распознавание структур, скрытых под непрозрачными в оптическом

диапазоне покрывами, с помощью систем миллиметрового радиовидения может осуществляться как в ближней зоне (на расстоянии нескольких или десятков длин волн), так и в дальней зоне этих структур.

В докладе представлены экспериментальные результаты, полученные с помощью двухмерной приемной матрицы размерами 8×8 элементов, каждый из которых представляет собой модифицированную щелевую антенну, нагруженную детектором с планарным диодом Мотта. Сигналы матрицы усиливаются операционными усилителями и обрабатываются цифровой системой с возможностью визуализации результатов на мониторе РС. Исключительными особенностями приемной системы являются: значительная вольт-ваттная чувствительность диодов в окрестности частоты 94 ГГц (порядка 10^4 В/Вт) и высокий темп съема данных с матрицы, обеспечиваемый использованием современных АЦП и микропроцессора (250 кадров в секунду без визуализации данных). Основное внимание уделено оценкам чувствительности активной системы радиовидения, проведенное с помощью проводящих сфер разного диаметра, располагаемых в различных сочетаниях. Представлены также предварительные результаты визуализации проводящих объектов сложной структурной формы в их ближней зоне с использованием освещения объектов монохроматическим и «квазишумовым» сигналом.

Были получены дифракционные картины рассеяния монохроматического сигнала 94 ГГц, зарегистрированные с помощью одного элемента матрицы, сканирующего с помощью прецизионного позиционера (границы линейной погрешности $\pm 0,15$ мм) плоский металлический диск диаметром 146 мм с наклеенными на нем фигурами – прямоугольниками и кругами из листового радиопоглощающего материала (РПМ). Характерные размеры плоских фигур – много больше длины волны (рис. 1, а), расстояние дальней зоны для них было много больше расстояния от диска до матрицы,

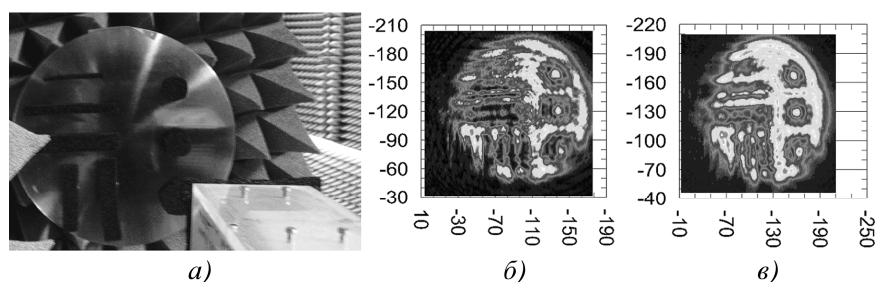


Рис. 1 Дифракционная картина рассеяния металлического диска с наклеенными фигурами из РПМ:

a – фотография диска; *б* – монохроматическая подсветка $f = 94,2$ ГГц;
в – подсветка квазишумовым источником

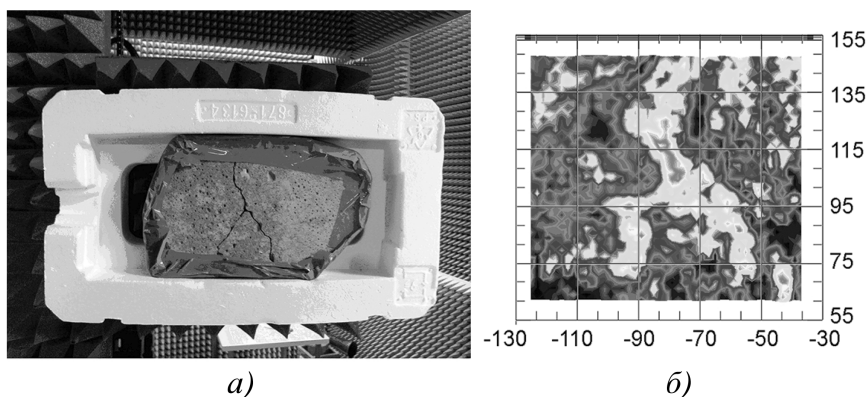


Рис. 2. Дифракционная картина рассеяния бетонного блока с трещиной:
a – фотография блока; *b* – зарегистрированная картина

поэтому дифракционные поля рассеяния от структур из РПМ представляют собой, в основном, прожекторные пучки с поперечными сечениями, примерно подобными рассеивающим фигурам (рис. 1, *б*). Диапазон изменений сигнала, соответствующий цветовой гамме, от красного до малинового, соответствует примерно 50 единицам. Изображения могли быть получены любым из 64 элементов матрицы с учетом их смещения в поле матрицы.

В результате проведения этих экспериментов была оценена возможность обнаружения трещин в бетоне за покрывающим его сухим диэлектрическим материалом. Для иллюстрации такой возможности измерены диаграммы интенсивности обратного рассеяния растрескавшегося бетонного образца (рис. 2, *а*), полученные также сканированием матрицей поверхности, облученной монохроматическим сигналом, размещенной на расстоянии 80 мм от поверхности бетона. Средняя ширина щели в образце бетона была менее 3 мм (~ длины волны). Получаемые с помощью матрицы распределения адекватно передают структуру трещин (рис. 2, *б*).

Известно, что использование для получения изображений объектов монохроматического когерентного сигнала приводит к образованию спеклов. При использовании в экспериментах «квазишумового» источника, характеризующегося параметрами: интегральная мощность 20 мВт в полосе 75...110 ГГц, были получены дифракционные изображения интенсивности сигнала обратного рассеяния того же проводящего диска с наклеенными фигурами из РПМ (рис. 1, *в*). Результаты экспериментов сравниваются по интенсивности с сигналами, рассеянными на фиксированной частоте. Они демонстрируют уменьшение спекл структуры распределения интен-

сивности, и одновременное снижение контрастности ее элементов. Абсолютные значения принятых сигналов пропорциональны плотности мощности в полосе операционных усилителей детекторного приемника, примерно в три раза меньше сигналов, полученных на фиксированной частоте.

Значительное число экспериментов по получению радиоизображений было проведено с помощью однолинзового асферического объектива из полиэтилена низкого давления. Объектив диаметром 100 мм, с фокусным расстоянием 100 мм, разработанный специально для получения изображений объектов, располагаемых на расстоянии порядка полутора метров, с пространственным разрешением структуры объектов порядка 3 см. Расстояние от объектива до плоскости из диэлектрика, на которой крепились сферы различных диаметров и их комбинации составляло 170 см. Диаметры сфер были равны 150, 100, 50 и 36 мм. Полученные с помощью объектива и разработанной приемной матрицы радиовидения сигналы изображены в виде гистограмм интенсивности. Проведенный анализ изображений показал возможность обнаружения и идентификации положения самой маленькой сферы – диаметром 36 мм. Так как эффективная поверхность рассеяния сфер хорошо изучена для диаметров много больше длины волны, полученное значение сигнала рассеяния от этой сферы является калибровочной оценкой минимально обнаружимой ЭПР цели с помощью разработанной матрицы радиовидения. Эксперименты с проводящими сферами также показали наличие эффектов влияния антенных элементов приемной решетки. На отдельных изображениях видны ложные лепестки, связанные, как показал детальный анализ, проведенный с помощью пакетов электромагнитного моделирования, с взаимодействием антенных элементов. Взаимодействие наиболее сильно в Е-плоскости антенн, ориентированной поперек щелевых микрополосковых линий, на основе которых созданы элементы антенной решетки. Тем не менее, структура, получаемых изображений позволяет четко идентифицировать наличие рассеивающих объектов с ЭПР более 100 кв. длин волн. Технологии, примененные при создании матрицы, позволяют увеличить в 1,5 раза диаметр объектива, увеличить дальность действия установки и, увеличив размеры матрицы до 16×16 элементов, производить оконтуривание получаемых изображений для их распознавания.

Перспективными направлениями развития созданной системы радиовидения являются комплексирование использованных детекторов с МШУ и разработка широкополосных малогабаритных антенн, удобных для объединения их в антенные решетки.

ПОРТАТИВНЫЙ СШП РАДИОТОМОГРАФ

Якубов В.П., Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н., Клоков А.В.

*Национальный исследовательский Томский
государственный университет, г. Томск, Россия*

В работе представлена плоская неэквидистантная антенная решетка из передающих и приемных СШП элементов в составе портативного 3D радиотомографа. Приведены характеристики решетки и результаты обработки экспериментальных данных, подтверждающие работоспособность радиотомографа.

Для решения задачи СШП радиоволновой томографии заданной области пространства необходимо обеспечить набор многоакурсных проекций. Это возможно достигнуть либо путем выполнения двумерного сканирования приемо-передающим модулем, либо путем проведения многопозиционных измерений с использованием двумерной антенной решетки. Основная идея обработки СШП данных восходит к технологии радара с синтезированием апертуры (РСА) и методу обратной фокусировкой излучения [1, 2].

На кафедре радиофизики Томского государственного университета авторами доклада была разработана плоская неэквидистантная антенная решетка для 3D радиотомографии, представленная на рис. 1. Размеры решетки составили 55×44 см. Количество антенных элементов – 22, из которых 6 являются передающими и 16 – приемными. В качестве приемо-передающего элемента решетки использовалась малогабаритная СШП антенна, разработанная на кафедре радиофизики ТГУ. Расположение антенн оптимизировалось по критерию максимального качества радиоизображения. На рисунке 2 показано расположение приемных и передающих антенн, где черными точками отмечены передающие антенны, белыми приемные. Коммутация приемных и передающих антенн осуществлялась в режиме тактирования. При этом в процессе излучения каждой передающей антенны происходит опрос всех приемных антенн, т.е. реализуется тактированный режим включения антенных элементов.

Для коммутации каналов антенной решетки был разработан специальный блок управления [3], построенный на основе двух восьми канальных и одного шести канального механических СШП коммутаторов фирмы «DowKey», перекрывающих частотный диапазон от 0 до 18 ГГц. Развязка между каналами составила 60 дБ и время переключения – 15 мс. Для синхронизации измерений и регистрации сверхширокополосных импульсов использовался двухканальный стробоскопический цифровой осциллограф Picoscope-9100, работающий в диапазоне от 0 до 12 ГГц.

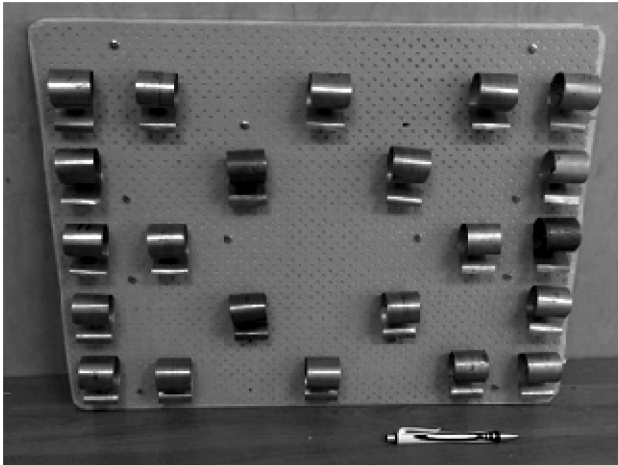


Рис. 1. Антенная решетка

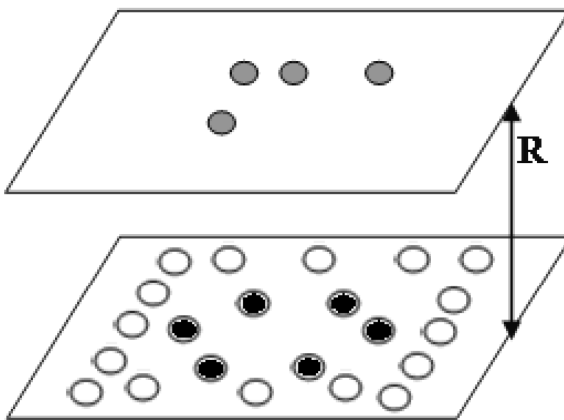


Рис. 2. Схема эксперимента

Сбор данных, управление коммутацией каналов и томосинтез радиоизображения осуществлялись на стандартном ноутбуке с использованием специально разработанной программы в среде MathLab.

Оценка важных параметров разработанной антенной решетки, таких как быстродействие и разрешение проводилась экспериментально. Было установлено, что время опроса решетки и последующего восстановления трехмерного радиоизображения составляет 8 с. Аналогичная зарубежная решетка требует для этих операций не менее 20 мин [4].

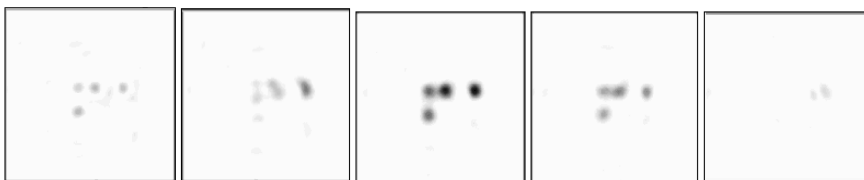


Рис. 3. Радиоизображения слоев томограммы 4-х точечных тестовых объектов

Для определения разрешающей способности решетки эксперимента проводился эксперимент с монетами разного диаметра. Схема эксперимента представлена на рис. 2. На рисунке 3 представлены радиоизображения слоев томограммы для четырех монет достоинством 10 копеек диаметром 1,7 см, расположенных на расстоянии $R = 33$ см от антенной решетки.

Каждый слой соответствует определенной дальности, отсчитываемой от плоскости антенной решетки. Линейные размеры слоя 50×50 см, расстояние между слоями 1 см. Положение центрального слоя соответствует дальности $R = 33$ см. Расстояния между центрами монет составляли 5 см, 6,5 и 8 см. Анализ радиоизображений, представленных на рис. 3, показывает, что разработанная решетка обеспечивает разрешающую способность в поперечном направлении не хуже 5 см, а в продольном направлении не хуже 2 см.

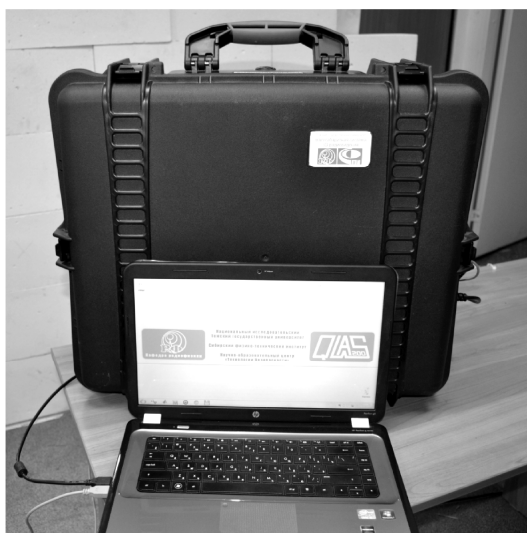


Рис. 4. Внешний вид переносного радиолокационного томографа

Для удобства использования и транспортировки антенная решетка и ее блоки были размещены в пластиковом чемодане рис. 4. На корпус чемодана выведены разъем для питания от сети 220 В и разъем USB для связи с ноутбуком. Таким образом, все измерения можно проводить сразу, не открывая чемодан. Управление коммутацией, расчет 3D томограммы и ее визуализация по слоям осуществляется с помощью стандартного компьютера типа ноутбука.

Литература

1. **Якубов В.П., Беличенко В.П. Фисанов В.В.** Основы электродинамики излучения и его взаимодействия с веществом. Томск: Изд-во НТЛ. 2010. 237 с.
2. **Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю.** Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли: Учебное пособие для вузов / Под. ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2005.
3. **Коммутируемая** сверхширокополосная антенная решетка для радиотомографии / Р.Н. Сатаров, И.Ю. Кузьменко, Т.Р. Муксунов и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. Т. 55, № 8. С. 26 – 30.
4. **Charvat G., Kempel L., Rothwell E., Coleman C., Mokole E.** A Through-Dielectric Ultrawideband (UWB) Switched-Antenna-Array Radar Imaging System // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. November, 2012. Vol. 60. No 11. P. 5495 – 5500.

СЕКЦИЯ 6. ТЕЧЕЙСКАНИЕ, КАПИЛЛЯРНЫЕ, КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ НК И ТД

Руководители секции: Сажин С.Г., Мигун Н.П., Туробов Б.В.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ И ЖЕСТКОСТНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Бакулин В.Н.¹, Ларин А.А.², Резниченко В.И.³

¹*ИПРИМ РАН, Москва, Россия;*

²*ОАО «ММЭЗ-КТ», Москва, Россия;*

³*МАИ (НИУ), Москва, Россия*

В настоящее время перед такими отраслями промышленности, как авиа-, вертолето- и ракетостроение стоят задачи повышения надежности изделий из композиционных материалов, находящихся все большее применение в различных деталях, узлах и агрегатах.

В связи с этим выдвигаются требования проведения неразрушающего контроля конструкций с высокой точностью и чувствительностью к выявлению и позиционированию дефектов внутренней структуры композитов на полимерных термореактивных и термопластичных смолах.

Для оценки степени изменения прочностных, жесткостных и ресурсных свойств изделий из композиционных материалов возможно использование результатов неразрушающего контроля конструкций, что позволит получить исходную информацию о степени дефектности материала. Выявление дефектов вида «расслоение», «трещина», «порообразование», «инородное включение», «разрыв армирующей структуры» и т.д. позволяет после проведения неразрушающего контроля подготовить входные данные для расчета оценки прочности и жесткости поврежденных изделий из композиционных материалов.

Для дефектов вида «порообразование» и «инородное включение» представлены качественные зависимости изменения прочностных и жесткостных свойств композита, основанные на методах математической статистики и обработке результатов испытаний образцов.

Для дефектов вида «расслоение» определены коэффициенты концентрации напряжений в локальной зоне дефекта в зависимости от положения расслоения, его геометрических параметров, используемой системы армирования монослоев.

Разработанные теоретические модели оценки снижения прочностных свойств образцов КМ с дефектами армирующей структуры верифицированы испытаниями изделий с заранее созданными дефектами, а также конечно-элементным моделированием в специализированном программном комплексе MSC.Nastran/Patran.

ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ КАРБАМИДА

Баранова Н.И., Сажин С.Г.

ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» Дзержинский политехнический институт (филиал), г. Дзержинск, Нижегородская обл., Россия

Введение

Важную роль при решении задач об эффективной работе химико-технологических производств, а также об улучшении качества выпускаемой продукции занимают задачи автоматизации, как производства в целом, так и отдельных его участков. Для реализации системы управления стадиями синтеза и дистилляции, требуется осуществить выбор датчиков для измерения параметров аппаратов технологической схемы. Одним из ключевых факторов в формировании спроса является качество производимой продукции. Контроль качества стал необходимым элементом конкурентной стратегии любого современного предприятия. Таким образом, в представленной работе предложено произвести инструментальную диагностику процесса получения карбамида, уделив особое внимание процессу аналитического контроля стадии синтеза и дистилляции рассматриваемого производства.

В настоящее время наиболее признаны и широко применяются замкнутые схемы производства карбамида с полным возвратом в процесс непрореагировавших NH_3 и CO_2 . Из всех известных способов получения карбамида промышленное значение получил процесс синтеза карбамида из аммиака и диоксида углерода по схеме со стриппинг-процессом. Метод получения карбамида основан на взаимодействии аммиака и двуокиси углерода в жидкой фазе при оптимальном мольном соотношении компонентов (3,2...3,6) : 1 : (0,60...0,83), давлении 14,9...15,4 МПа, температуре 180...189 °С, с последующей трехступенчатой дистилляцией, полным жидкостным рециклом непрореагировавших NH_3 и CO_2 и форвыпаркой.

В условиях синтеза протекают процессы образования карбамата аммония, карбамида, разложения карбамата аммония, а также образования углеаммонийных солей (УАС). Синтез протекает в колонне синтеза (поз. КС)

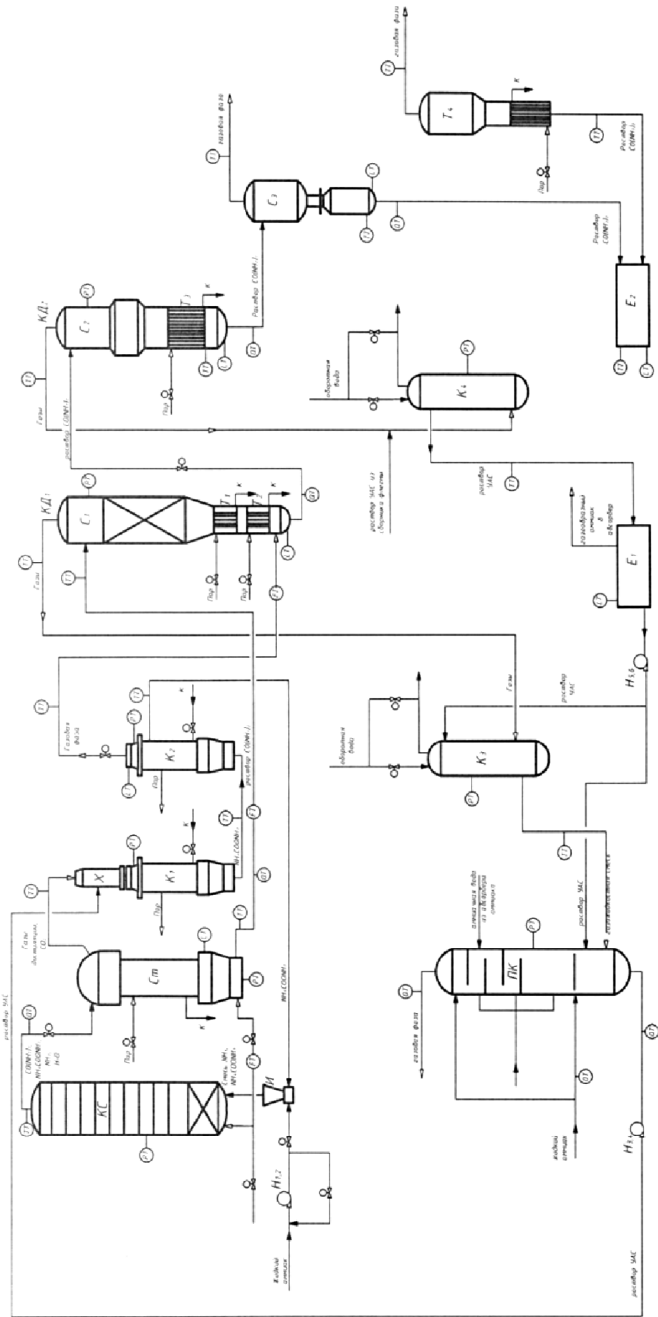


Рис. 1. Функциональная схема стадий синтеза и дистилляции производства карбамида по схеме со струйным процессом

в две стадии: стадия образования карбамата аммония, описываемая ниже представленным уравнением



и стадия дегидратации карбамата аммония



Для построения системы управления, необходимо иметь показания температуры и давления каждого из аппаратов технологической схемы (рис. 1), а также значения входных расходов аммиака, воды и диоксида углерода.

Благодаря надежной конструкции термопар, возможности работать в широком диапазоне температур и дешевизне, измерение температур с их помощью получило широкое распространение. Термопары незаменимы при измерении высоких температур (вплоть до 2200 °С) в агрессивных средах, и позволяют обеспечить высокую точность измерения температуры на уровне $\pm 0,01$ °С. Для измерения температуры на производстве карбамида предлагается выбрать термопару ТХА-9416, которая может использоваться в агрессивных средах и предназначена специально для измерения температуры в азотосодержащих средах на взрывоопасных производствах [1].

Для нахождения степеней отгона и конденсации компонентов необходимо знать давление в каждом из аппаратов технологической схемы. Для измерения давления предлагается выбрать датчики фирмы Yokogawa, являющейся одной из сильнейших и крупнейших компаний на мировом рынке промышленной автоматизации. Датчик избыточного давления ЕJA530А ввертного типа предназначен для измерения давления жидкости, газа или пара. Прибор обеспечивает измерение давления с погрешностью не более, чем $\pm 0,2$ % от шкалы и позволяет измерять давление до 50 МПа [2].

В процессе управления необходимо контролировать расходы аммиака, воды и углекислого газа, представленных как в жидкой, так и газовой фазах. При этом максимальный расход может достигать 115 м³/ч. Для измерения массового расхода предлагается выбрать интеллектуальный вихревой расходомер 8800D фирмы Emerson Process Management во взрывозащитном исполнении, который возможно устанавливать на трубопроводах с давлением до 25 МПа [3].

Для измерения уровня в стриппере (поз. СТ) и конденсаторе низкого давления (поз. К₂) выбираются высокоточные интеллектуальные датчики гидростатического уровня Rosemount 3051S – L, в связи с высоким рабочим давлением в аппаратах (до 18 МПа) [4]. В остальных же аппаратах для непрерывного измерения уровня жидких (в том числе агрессивных) сред используется емкостной преобразователь уровня ПУМА 115 фирмы «Контакт – 1» [5].

Для автоматического анализа аммиака в воздухе наружной установки, был выбран газоанализатор электрохимический ДАХ-М фирмы «Аналит-прибор», предназначенный для контроля параметров воздуха рабочей зоны во взрывоопасных производствах [6].

Все аппараты высокого давления имеют систему контроля состояния футеровки. Для этого азот под давлением не более 0,013 МПа подается в контрольные трубки аппаратов поз. КС, Ст, К₁, К₂, на выходе из которых пропускается через колбы с раствором индикатора, а также через рН-метр. Визуальное наблюдение за окраской раствора индикатора и рН позволит операторам синтеза и дистилляции определить неисправности футеровки, а, следовательно, своевременно обнаруживать утечку аммиака.

Внедрение системы контроля качества продукции существенно снижает затраты предприятий, связанные с возникновением брака, помогает разобраться со сложностями, которые служат препятствием на пути производства продукции. Ее задача состоит в проверке тщательным образом подобранных данных, обнаружении отклонения параметров от запланированных значений, поиске причины отклонения, устранении неполадки, контрольной проверке соответствия запланированных данных (стандарту или норме).

Аналитический контроль производства карбамида на стадии синтеза и дистилляции производится по 9 анализным точкам. Наиболее доступный метод контроля состава материальных потоков путем химического анализа обладает существенными недостатками – длительность анализа, возможные погрешности, как при отборе проб, так и в ходе анализа. Поэтому предлагается использовать анализаторную технику. Например, для контроля газовой фазы на выходе из промывной колонны поз. ПК предлагается использовать непрерывный инфракрасный газоанализатор ULTRAMAT 6 фирмы Siemens [7].

Таким образом, инструментальная диагностика как один из видов технической диагностики позволит обеспечить высокий уровень экологичности процесса и его безопасность.

Литература

1. <http://blog.kip-e.ru/publ/temperatura/termopary>
2. <http://yokogawa.ru/measurementpressure>
3. <http://www.metran.ru/products/siz/dras/vih>
4. <http://www.metran.ru/products/siz/level/Differential-Pressure-Level>
5. <http://www.kontakt-1.ru/puma100.html>
6. http://www.analitpribor-smolensk.ru/products/bezopasnost_gazoanalizatory/stacionarnye_gazoanalizatory/dah_m7
7. <http://www.fizlabpribor.ru/Siemens/ULTRAMAT6.htm>

О ЛОЖНЫХ ДЕФЕКТАХ ПРИ КАПИЛЛЯРНОМ КОНТРОЛЕ

Глазков Ю.А.
РОНКТД, Москва, Россия

В некоторых инструкциях и технологических картах по капиллярному контролю предусматривается классифицировать обнаруживаемые индикаторные рисунки на округлые и протяженные, и браковать контролируемые детали в зависимости от количества тех или других. Как правило, такой подход без определения причин образования индикаторных рисунков приводит к не обоснованному бракованию деталей. Иногда объем перебраковки достигает 28...30 %, хотя при правильном применении капиллярного контроля она практически равна нулю. Естественно, большой объем перебраковки нежелателен, особенно при контроле деталей, имеющих большую стоимость, например, лопаток и дисков газотурбинных двигателей, а также других дорогостоящих деталей. Перебраковка чаще всего обусловлена тем, что при капиллярном контроле на поверхности проверяемых деталей возможно образование ложных дефектов. Так, в условиях производства технических изделий протяженные индикаторные рисунки, схожие с рисунком трещин, расслоений, непроваров и других опасных дефектов типа сплошности материала, могут образовывать границы участков поверхности с различной шероховатостью, допустимые мелкие складки и примятые чешуйки металла, появляющиеся при накатке резьбы, протяжке или при механической обработке, следы флюса, клея, жидкого стекла, термозащитного покрытия, волокна ветоши, окрашенные пенетрантом; следы гидроабразивной обработки поверхности детали и другие локальные допустимые изменения микрогеометрии поверхности или загрязнения. В условиях ремонтных заводов индикаторные рисунки протяженных ложных дефектов могут образовывать появившиеся в эксплуатации мелкие царапины, растрескивание и сколы окисной пленки, следы контакта с сопряженными деталями и линейный наклеп, участки повышенной окисляемости материала в виде шлейфа, линейные следы окисления металла под трещинами в удаленном хрупком лакокрасочном покрытии, смолистые эксплуатационные отложения, следы нагара, герметика, пригоревшей смазки, остатки не полностью удаленного лакокрасочного покрытия и т.п.

Для уменьшения уровня перебраковки деталей и снижения экономических потерь целесообразно ограничивать использование классификации индикаторных рисунков на округлые и протяженные. Это упрощенная классификация, не предусмотренная ГОСТ 18442–80 и ГОСТ 24522–80. Дефектоскописты и технологи должны различать индикаторные рисунки действительных и ложных дефектов, используя более широкий набор признаков индикаторных рисунков – основных и дополнительных. Основными признаками является геометрическая форма индикаторных рисунков раз-

ных дефектов, представляющая собой развитие классификации рисунков на округлые и протяженные. Наиболее существенными дополнительными признаками являются: место расположения индикаторного рисунка на поверхности детали; направление линии рисунка относительно оси детали, отверстий, действующих нагрузок; конфигурация линии рисунка, наличие изломов и разветвлений; подобие границ протяженных рисунков; четкость контуров рисунка; цвет, яркость и насыщенность окраски; микрорельеф поверхности в зоне индикаторного рисунка.

Поскольку индикаторные рисунки на поверхности деталей могут возникать не только в местах дефектов, то обнаружение рисунка, соответствующего основным признакам дефектов, еще не является однозначным и достаточным свидетельством наличия реального дефекта. Рисунок, являясь необходимым признаком дефекта, привлекает внимание специалиста, который по различным дополнительным признакам устанавливает наличие ложного либо реального дефекта, его протяженность, а иногда его вид и характер. Многие современные дефектоскопические материалы образуют достаточно четкие индикаторные рисунки, что позволяет решать эти задачи.

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА МИКРО- И НАНОМЕТРОВОМ МАСШТАБЕ

Гоголинский К.В., Потапов А.И., Сясько В.А
ЗАО «Константа», Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время в разных областях промышленности все чаще применяются технологии нанесения микро- и нанометровых покрытий, а также упрочнения и модификации поверхности для защиты от воздействия окружающей среды, уменьшения трения и износа в подшипниках и трущихся парах, повышения эффективности и увеличения срока службы обрабатываемого инструмента, обеспечения биологической совместимости имплантов в медицине, для декоративных целей и т.д. К таким покрытиям относятся гальванические, плазменные, магнетронные, электродуговые и др. Для упрочнения тонких приповерхностных слоев используются технологии лазерной закалки, химико-термические методы (азотирование, цементация и др.), различные технологии плазменной модификации и активации поверхности. Их толщина может быть от нескольких мкм до десятков нм.

Основными параметрами, определяющими качество и функциональные свойства покрытий и модифицированных слоев, являются толщина и шероховатость поверхности, а также механические свойства: твердость, модуль упругости, прочность, трещиностойкость, износостойкость, адгезия к подложке и др. Для контроля этих параметров используются микро/нано-

профилометры, сканирующие зондовые микроскопы, нанотвердомеры, скретч-тестеры, нанотрибомеры. Все эти приборы относятся к разряду сложного и дорогостоящего лабораторного оборудования. В настоящее время в Российской Федерации существует всего несколько испытательных лабораторий, оснащенных всем перечнем подобных приборов и способных проводить комплексные испытания поверхностных слоев и тонких покрытий. Такое положение, несомненно, отрицательно влияет на внедрение новых технологий в промышленности. Существует актуальная задача создания простого и дешевого прибора, позволяющего проводить комплексный анализ свойств поверхности в условиях заводских контрольно-испытательных лабораторий.

Для решения поставленной задачи в ЗАО «Константа» ведется разработка прибора, реализующего с помощью одной универсальной измерительной головки функции нанопрофилометра, нанотвердомера и скретч-тестера. В качестве первичного преобразователя используется универсальный зондовый датчик оригинальной конструкции [1] с закрепленной на нем трехгранной алмазной пирамидой (индентор Берковича). Датчик закреплен на пьезосканере, обеспечивающем перемещение в процессе измерений в диапазоне до 100 мкм с разрешением ~1 нм. Взаимное перемещение измерительной головки и контролируемого образца обеспечивается системой прецизионных линейных трансляторов с шаговыми двигателями. Прибор также оснащен оптическим микроскопом высокого разрешения с переменным увеличением. Такая конструкция позволяет реализовать режим нанопрофилометра для измерения параметров шероховатости, нанотвердомера для измерения твердости и модуля упругости методом измерительного индентирования [2], скретч-тестера для измерения прочности, трещиностойкости и адгезионных свойств покрытий. Все измерения проводятся в соответствии с российскими и международными стандартами. Компактная компоновка прибора позволяет использовать его в лабораторных условиях без применения специальных средств виброзащиты, в отличие от существующих аналогов.

В докладе обсуждаются реализованные в разрабатываемом приборе измерительные методики, их достоинства и ограничения. Проанализированы метрологические характеристики прибора.

Литература

1. **Гоголинский К.В., Маслеников И.И., Решетов В.Н., Усеинов А.С.** Универсальный зондовый датчик для сканирующих нанотвердомеров // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 5. С. 90.
2. **Гоголинский К.В., Сясько В.А.** Методы и средства контроля механических свойств микро- и нанометровых покрытий и модифицированных приповерхностных слоев // В мире НК. 2013. № 3(61) сентябрь. С. 43 – 48.

РАЗРАБОТКА МУЛЬТИСЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ВОЗДУХА НАСЕЛЕННЫХ МЕСТ

Зубков И.Л.

Дзержинский политехнический институт Нижегородского государственного университета им. Р.Е. Алексева, г. Дзержинск, Россия

В настоящее время существует проблема создания недорогих мобильных станций атмосферного мониторинга, позволяющих в реальном времени осуществлять контроль качества воздуха населенных мест (его приземного слоя) на предмет наличия в нем газов – основных приоритетных загрязнителей атмосферного воздуха (ОПЗАВ). В их число входят аммиак (NH_3), диоксид серы (SO_2) и сероводород (H_2S), а также пыль, монооксид углерода (CO) и диоксид азота (NO_2) [1].

Все методы и средства контроля ОПЗАВ можно разделить на традиционные химико-аналитические методы и инструментальные. До сих пор систематический контроль ОПЗАВ в приземном слое осуществляется службами Росгидромета с помощью традиционных химико-аналитических методов, включающих ручной отбор проб воздуха в поглотители с последующим их анализом в химической лаборатории [1]. В России практически полностью отсутствует третий уровень контроля атмосферного воздуха, основанного на передвижных станциях [2]. Кроме этого, необходимо отметить возрастающую роль «местного» анализа воздуха, связанную с террористическими угрозами и катастрофами техногенного характера. Эту проблему нельзя решить на основе ни химико-аналитических методов, ни традиционных аппаратурных физико-химических методов, т.е. на старой элементной базе газоаналитического приборостроения. Все больше газоаналитических задач решается с помощью миниатюрных приборов, работа которых основана на твердотельных, выполненных по технологии микроэлектроники, датчиках = химических сенсорах [3].

В 2005 г. в НИИ Химии ННГУ им. Н.И. Лобачевского была предложена концепция создания передвижной станции мониторинга ОПЗАВ в атмосферном воздухе на базе мультисенсорной системы типа электронный нос [4]. Такая система должна обладать быстрым, многократно обратимым неселективным (соразмерным) откликом в присутствии газов – ОПЗАВ, а также обладать достаточной чувствительностью, т.е. на уровне ПДК среднесуточной.

Данный мультисенсор должен состоять из массива сенсоров в количестве $N = M + 1$ (где N – количество сенсоров, а M – количество анализируемых компонентов). В качестве основы такой системы предложено использовать сенсоры на поверхностно – акустических волнах (ПАВ-сенсоры) и плосковолноводные оптические сенсоры, действие которых основано на эффекте полного внутреннего отражения (ПВО-сенсоры) (рис. 1) [5].

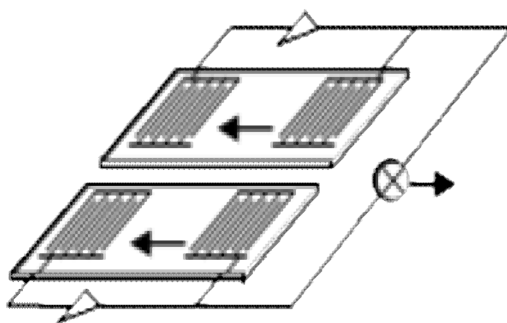


Рис. 1. ПАВ-сенсор в конструкции двойной линии задержки

Для получения быстрого и многократно обратимого отклика было предложено использовать в качестве чувствительных слоев сенсоров пленки органических полимеров (сополимеров диметилсилоксана и метилметакрилата) модифицированных катионами органических красителей. Молекулы красителей, вступая в специфическое взаимодействие с молекулами анализируемых газов, обеспечивая их хемосорбцию чувствительным слоем сенсора.

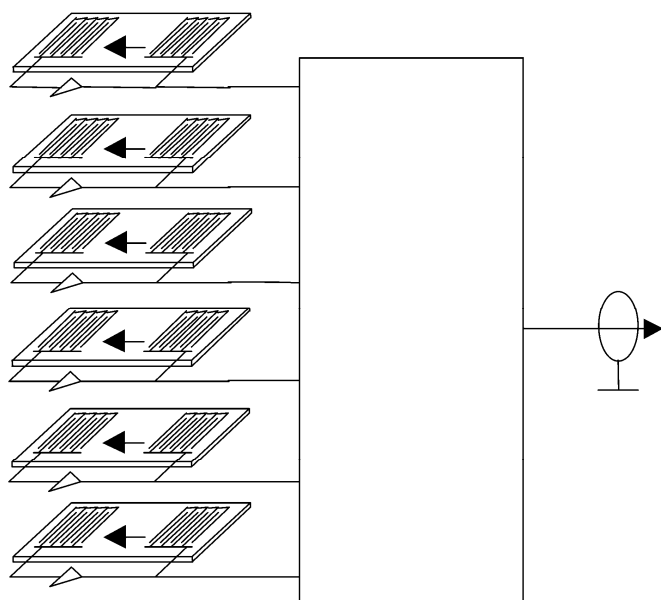


Рис. 2. Принципиальная схема мультисенсора, состоящего из 6 ПАВ элементов

Были получены результаты, подтверждающие быстрый многократно воспроизводимый отклик в присутствии газов – ОПЗАВ, с чувствительностью на уровне ПДК_{СС}, подтверждающий возможность создания на базе разработанных конструкций ПВО и ПАВ-сенсоров с чувствительными слоями – модифицированными полимерами мультисенсорной системы для мониторинга воздуха населенных мест. Также предложена конструкция мультисенсорной ячейки, состоящей из шести ПАВ-сенсорных элементов, входящих в состав трех дифференциальных ПАВ-датчиков в конструкции двойных линий задержки со своими чувствительными слоями – тонкими, порядка 0,1 мкм, пленками функциональных полимеров различного химического строения, в частности полидиметилсилоксан (ПДМС) и полиметилметакрилат (ПММА) (рис. 2).

Литература

1. РД 52.04.186–89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы // Госгидромет СССР. М., 1991. С. 92 – 100.
2. Попов А.А. // Приборы и системы управления. 1994. № 9. С. 15 – 17.
3. Попов А.А. Опыт и перспективы применения химических сенсоров для контроля экологической обстановки производственных и жилых зон // Функциональные материалы и структуры для сенсорных устройств: тезисы докл. Всеросс. конф. / ответст. за выпуск Л.Ю. Харченко, М.Л. Косинова. Институт неорганической химии СО РАН. Новосибирск, 1999. С. 25.
4. Соборовер Э.И. Разработка мультисенсорной системы типа «электронный нос» для мобильной станции мониторинга основных приоритетных загрязнителей атмосферного воздуха // Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности: 4-я Международная выставка и конференция; тезисы конф. 17–18 мая 2005 г. Москва. С. 26.
5. Соборовер Э.И., Зубков И.Л., Токарев С.В., Царапкин А.В., Ткаченко С.В. Сенсорные материалы, плосковолноводный оптический и на поверхностно-акустических волнах сенсоры для мультисенсорной системы атмосферного мониторинга // Датчик–2004. Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: материалы XVI научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов / под ред. профессора В.Н. Азарова. 23 – 30 мая 2004 г. М.: МГИЭМ, 2004. С. 109 – 111.
6. Соборовер Э.И., Тверской В.А., Токарев С.В., Царапкин А.В. Разработка мультисенсорной системы типа электронный нос для мобильной станции мониторинга атмосферного воздуха. 2. Исследования газодсорбционных свойств пленок функциональных полимеров // СЕНСОР. 2004. № 3. С. 41 – 47; 3. Газодиффузионные характеристики процесса сорбции газов пленками функциональных полимеров // СЕНСОР. 2004. № 3. С. 48 – 51.

7. **Соборовер Э.И., Зубков И.Л., Токарев С.В., Царапкин А.В.** Сенсорные материалы – функциональные полимеры для мультисенсорной системы атмосферного мониторинга // Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники: труды девятой Международной научно-технической конференции, ПЭМ–2004. Дивноморское, Россия, 12 – 17 сентября 2004 г. Ч. 1. С. 168 – 171.

КОНЦЕНТРАЦИЯ УТЕЧКИ ГАЗА В ПОДВИЖНОЙ ПОРИСТОЙ МЕМБРАНЕ

Костиков Е.С., Лобаев А.Н., Мясников В.М.

ФГБОУ ВПО НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия

Метод вторичной обработки дефектоскопического сигнала при локализации течей (ЛТ) предполагает наличие исчерпывающей информации о концентрации утечки пробного газа в пористой мембране [1]. В ранее опубликованной работе [2] получена математическая зависимость, описывающая распределение пробного газа в мембране, покоящейся относительно контролируемой поверхности. По ряду причин такой вид накопления не всегда возможно реализовать, и тогда используют подвижные мембраны.

Целью данной работы являлось исследование концентрационного поля утечки в подвижной пористой мембране с ограничением оттока пробного газа с ее верхней грани.

Для ЛТ используют жидкостные или газовые методы течеискания. Жидкостные методы контроля герметичности замкнутых изделий, как правило, совмещают с гидравлическими испытаниями. В зависимости от способа получения первичной информации порог чувствительности этих методов может находиться в диапазоне от 10^{-7} до 10^{-5} м³·Па/с. Место расположения течи дефектоскопистом определяется визуально. На стадии гидравлических испытаний производят отбраковку больших течей. Если по техническим требованиям установлен более низкий порог чувствительности, то для этих целей используют газовые методы, реализующие способ щупа, обеспечивающий минимальный порог чувствительности 10^{-10} м³·Па/с.

Если допустить, что максимальный поток после гидравлических испытаний составит 10^{-4} м³·Па/с, то процесс формирования концентрационного поля в мембране будет обусловлен не конвективным потоком пробного газа от течи, а его диффузией, поскольку число Пекле в этом случае составит не более 0,01. Учитывая этот фактор и используя метод квазигомогенного приближения, формирование распределения пробного газа опишется уравнением нестационарной диффузии.

Расчетная схема для концентрационного поля утечки пробного газа для рассматриваемого случая показана на рис. 1.

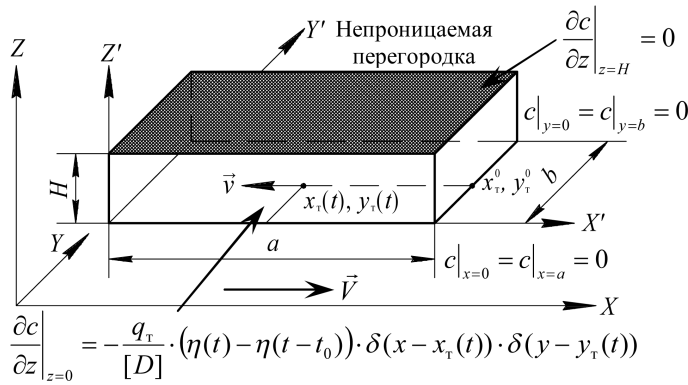


Рис. 1. Расчетная схема для концентрационного поля утечки пробного газа

Для описания данного процесса получена математическая модель:

$$\varepsilon \frac{\partial c}{\partial t} = [D] \Delta c,$$

$$c|_{x=0} = c|_{x=a} = c|_{y=0} = c|_{y=b} = c_{\phi},$$

$$\frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=0} = - \frac{q_T}{[D]} (\eta(t) - \eta(t - t_0)) \delta(x - x_T(t)) \delta(y - y_T(t)), \quad \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0,$$

$$\Omega: 0 \leq x \leq a, \quad 0 \leq y \leq b, \quad 0 \leq z \leq H,$$

$$x_T(t) = x_T^0 + v_x t,$$

$$y_T(t) = y_T^0 + v_y t,$$

где ε – пористость материала; $[D]$ – коэффициент эффективной диффузии; $c \equiv c(x, y, z, t)$ – концентрация ПГ в пористой мембране; c_{ϕ} – фоновая концентрация пробного газа; x, y, z – координаты точки в пористом теле; a, b, H – размеры пористого тела; q_T – поток пробного газа через канал течи; $x_T(t), y_T(t)$ – текущие координаты течи; $\delta(\cdot)$ – дельта-функция Дирака; Δ – оператор Лапласа; $\eta(\cdot)$ – единичная функция Хевисайда; $t_0 = a/v_x$ – время перемещения мембраны над течью; x_T^0, y_T^0 – координаты течи в начальный момент времени; v_x, v_y – проекции вектора скорости мембраны \vec{v} на оси координат $X'Y'$ (см. рис. 1).

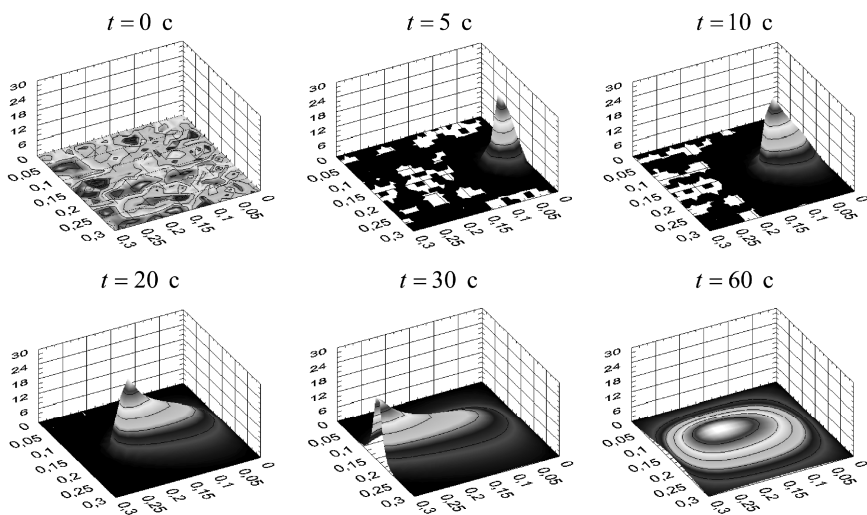


Рис. 2. Эволюция концентрационного поля утечки пробного газа на высоте $z = H$:

Параметры: $a = b = 0,3$ м, $H = 0,01$ м, $y_T^0 = 0,15$ м,
 $q_T = 10^{-3}$ м³·Па/с, $[D] = 0,05$ м²/с, $v_x = 0,01$ м/с

На рисунке 2 показана картина эволюции концентрационного поля от течи, полученная в результате компьютерного моделирования в среде LabVIEW.

В докладе приводятся результаты исследований, характеры зависимостей формализованных параметров дефектоскопического сигнала от параметров a , $[D]$, v_x , y_T^0 . Установлено, что максимальное значение средней концентрации на высоте $z = H$ достигается при $a = b = 0,028$ м.

Полученные результаты исследования позволяют выбрать оптимальные конструктивные и режимные параметры модуля формирования концентрационного поля утечки, а формализованные параметры определить структуру алгоритма вторичной обработки дефектоскопического сигнала.

Литература

1. Мясников В.М., Сажин С.Г., Костиков Е.С. Влияние характерных параметров зоны регистрации утечки на чувствительность локализации течи // Дефектоскопия. 2012. № 6. С. 64 – 69.
2. Мясников В.М., Сажин С.Г., Костиков Е.С. Распределение утечки пробного газа в среде материала с открытопористой структурой // Дефектоскопия. 2012. № 5. С. 43 – 48.

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ КАПИЛЛЯРНЫЙ КОНТРОЛЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОСВЕТИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ФИОЛЕТОВЫХ СВЕТОДИОДОВ

Мигун Н.П., Деленковский Н.В., Гнусин А.Б.
Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Введение

Для выполнения качественного люминесцентного капиллярного контроля обычно используются переносные и стационарные ультрафиолетовые облучатели на основе ртутных ламп. Такие устройства имеют значительные габариты и стоимость. При их использовании существует повышенная опасность облучения оператора жестким ультрафиолетовым излучением. Более удобными в использовании являются малогабаритные ультрафиолетовые (УФ) осветители на основе светодиодов. В таких устройствах применяются мощные (3 Вт) ультрафиолетовые светодиоды с пиковой длиной волны 365 нм. Они имеют высокую стоимость, которая обусловлена, в основном, высокой стоимостью применяемых светодиодов. При использовании таких ламп, как и ртутных, также существует опасность нежелательного облучения оператора ультрафиолетом излучением.

В связи вышеизложенным представляется актуальной разработка нового сравнительно недорогого и безопасного для обслуживающего персонала облучателя на основе светодиодов с другими длинами волн.

Основные результаты

Нами проведены исследования возможности применения при люминесцентном капиллярном контроле осветителей на основе малогабаритных **фиолетовых** светодиодов с пиковой длиной волны 400...405 нм. Их стоимость более чем на порядок меньше, чем у аналогичных ультрафиолетовых светодиодов, например, типа NSHU551B (Nichia). Наличие у исследованных светодиодов фокусирующей оптической линзы с углом расхождения пучка $\pm 10^\circ$ обеспечивало возможность высокой концентрации светового потока в зоне контроля. Исследования проводились на специальных контрольных образцах из нержавеющей стали ферритного класса AISI 430, каждый из которых содержал по пять дефектов. Дефекты наносились по разработанной в ИПФ НАН Беларуси технологии без нанесения на образец дополнительных покрытий и его термообработки. Такая технология позволила получить дефекты, не выходящие на край образца, с шириной раскрытия 1...10 мкм и глубиной 80...440 мкм. Эффективность работы осветителей на основе исследуемых фиолетовых светодиодов сравнивалась с ртутной УФ лампой Helling SUPERHELL C10A и мощным ультрафиолетовым 3 Вт светодиодом NCSU033B (Nichia). При этом, учитывая, что мощность лампы SUPERHELL C10A (100 Вт) более чем на порядок превышала сум-

марную мощность блока из 100 фиолетовых светодиодов (≈ 7 Вт), расстояние между контролируемым образцом и осветителем на основе светодиодов принималось в три раза меньшим, чем для лампы и составляло 110...120 мм. УФ светодиод NCSU033В в экспериментах использовался без отражателя и также устанавливался на расстоянии 110...120 мм от образца. Для количественной обработки результатов исследований использовалась автоматизированная система анализа видеоизображений [1]. Люминесцентный контроль образцов выполнялся в соответствии с СТБ 1172–99 с использованием водосмываемого пенетранта.

На рисунке 1 представлены полученные индикаторные следы дефектов на образцах при облучении различными источниками ультрафиолета. Как видно из приведенных фотографий (рис. 1, б, з), яркость следов дефектов при использовании линейки из 50 фиолетовых светодиодов (сила света в зоне контроля – 9 Кд) превышает аналогичный параметр для лампы Helling SUPERHELL C10A. Повышение силы света до 18 Кд обеспечивает дальнейшее существенное повышение яркости следов дефектов (рис. 1, е).

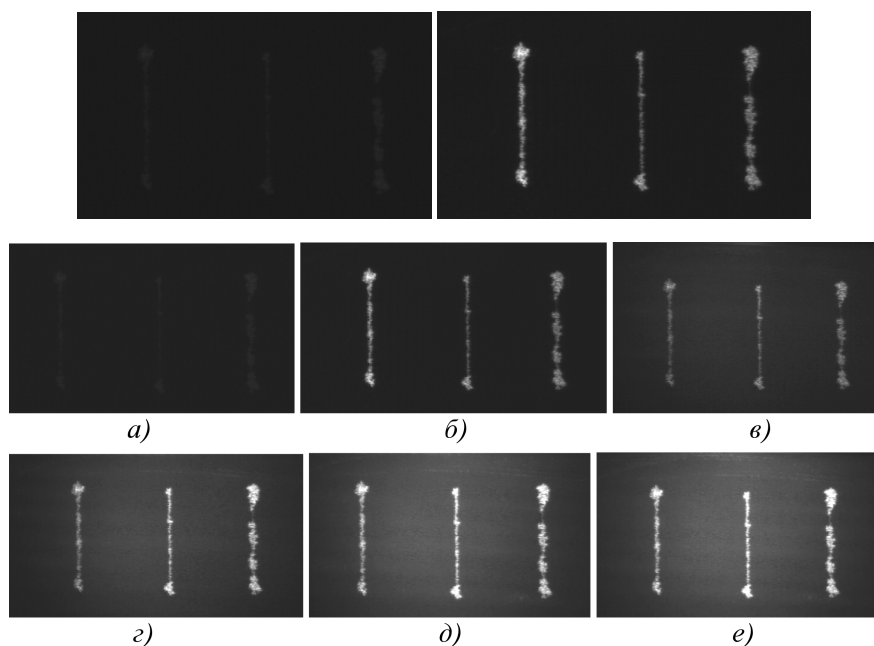


Рис. 1. Люминесцентный капиллярный контроль образцов при подсветке следов дефектов:

a – 3 Вт УФ-светодиод NCSU033В; *б* – лампа Helling SUPERHELL C10A;
в – *е* – фиолетовые светодиоды (*в* – 25 шт., *з* – 50 шт., *д* – 75 шт., *е* – 100 шт.)
(ширина раскрытия дефектов слева направо 6, 2, 5 мкм, глубина 220...240 мкм)

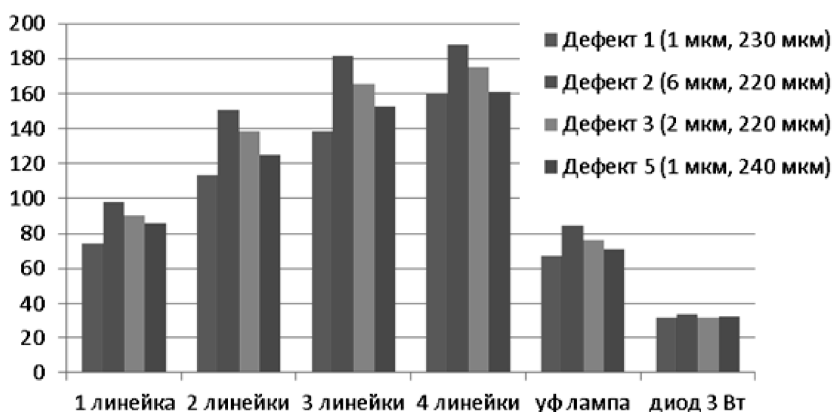


Рис. 2. Диаграмма изменения средней яркости люминесцентных индикаторных рисунков (отн. ед.) при облучении их различными источниками УФ-излучения:

1 – 4 – линейки по 25 фиолетовых светодиодов каждая;

УФ-лампа Helling; 3 Вт УФ-светодиод NCSU033B

(в скобках указаны раскрытие и глубина дефектов (мкм))

На рисунке 2 представлена одна из диаграмм зависимостей средней яркости следов дефектов от вида УФ-осветителя и силы света (для фиолетовых светодиодов). Установлено повышение яркости свечения следов дефектов более чем в два раза при использовании линейки из 100 фиолетовых светодиодов по сравнению с лампой Helling SUPERHELL C10A и в 3-3,5 раза по сравнению с 3 Вт УФ-светодиодом NCSU033B. Такие зависимости наблюдаются в основном для всех дефектов с разными геометрическими характеристиками. Контраст индикаторных рисунков относительно окружающего их фона составлял 0,1...0,2 при освещении УФ-светодиодом NCSU033B (3 Вт), 0,4...0,5 при освещении набором из 100 фиолетовых светодиодов и 0,5...0,6 при освещении УФ-лампой Helling SUPERHELL C10A.

Полученные экспериментальные результаты показывают перспективность применения в осветителях для люминесцентного капиллярного контроля **фиолетовых** светодиодов с пиковой длиной волны более 400 нм, которые сравнительно дешевле и экологически безопаснее УФ-светодиодов с пиковой длиной волны 365 нм. Осветители на основе фиолетовых светодиодов могут обеспечивать надежную выявляемость наиболее часто встречаемых в металлических изделиях дефектов с раскрытием от 1 мкм и глубиной от 80 мкм и более.

Литература

1. Мигун Н.П., Гнусин А.Б., Волович И.В. Компьютеризированная система для количественной оценки качества дефектоскопических материалов // Промышленная безопасность. 2004. № 1. С. 34 – 36.

К ВОПРОСУ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ ЛОКАЛИЗАЦИЙ ТЕЧЕЙ

Мясников В.М.

ФГБОУ ВПО НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия

Производительность средств течеискания напрямую связана с уровнем автоматизации контроля герметичности. В НГТУ им. Р.Е. Алексеева накоплен большой опыт по созданию автоматизированных установок контроля герметичности (АУКГ), которые способны контролировать степень герметичности изделий, а также находить положение течи, то есть локализовать течь (ЛТ) на контролируемой поверхности. Следует отметить, что на раннем этапе развития АУКГ наибольшее внимание уделялось исследованиям по созданию АУКГ, способных контролировать степень герметичности изделий. В последние годы появилась потребность в установках для локализации течей (УЛТ), в связи с чем возникла необходимость в модернизации методов и средств УЛТ и создании научно-технических основ в области их разработки.

На структурной схеме показаны функциональные модули УЛТ (за исключением модуля управления). Схема учитывает практически все модули, используемые в средствах ЛТ газоаналитических методов регистрации пробного газа. Таким образом, в случае отсутствия какого-либо модуля его можно исключить из структурной схемы.

В докладе приводятся результаты системного анализа существующих и вновь разработанных функциональных модулей. С целью практического использования результатов исследования рассматриваются критерии выбора функционального модуля, а для вновь разработанных модулей объясняется принцип функционирования, физическая и техническая сущность.

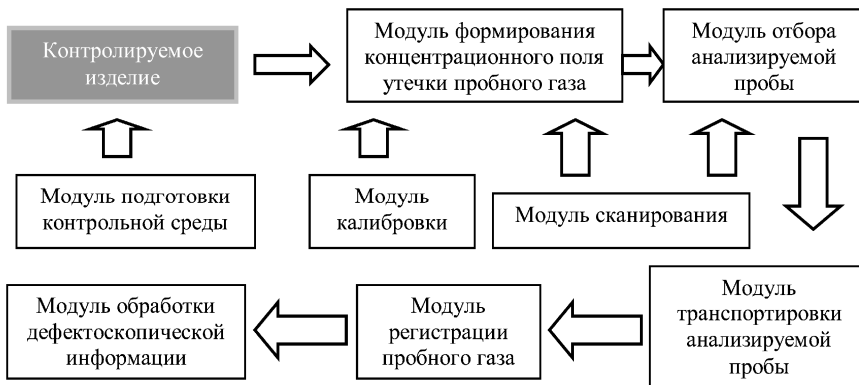


Рис. 1. Структурная схема УЛТ

Модуль формирования концентрационного поля утечки реализует следующие способы накопления пробного газа:

- накопление утечки происходит в атмосфере или в пористой мембране, при этом мембрана может покоиться относительно контролируемой поверхности или перемещаться;
- мембрана располагается в атмосфере, в вакууме или в среде защитного газа;
- на верхнюю грань мембраны наносят пленку, изготовленную из газонепроницаемого или селективнопроницаемого материала.

Сканирование контролируемой поверхности пробоотборным устройством или непосредственно детектором осуществляется с учетом выходного сигнала с течеискателя или по жесткой программе.

Отбор анализируемой пробы осуществляется:

- конвективным или диффузионным способом;
- разным количеством одновременно используемых пробоотборных устройств;
- из различной области отбора пробы (в точке, с поверхности, из объема).

По виду подачи анализируемой пробы в течеискатель:

- проточный или диффузионный;
- схема прямотока или противотока;
- в среде газа носителя или атмосферного воздуха.

Получение дефектоскопической информации:

- в УЛТ имеет место одномерная или двухмерная информации;
- дефектоскопическая информация получают из массива данных или по формализованным параметрам дефектоскопического пика.

В заключение следует отметить, что первая автоматизированная масс-спектрометрического УЛТ, используемая в производстве, позволила на порядок повысить производительность контроля, а вместе с тем повысилась и достоверность результатов контроля. Одновременно хотелось бы акцентировать внимание специалистов, работающих в направлении создания АУКГ, что наиболее актуальным направлением является создание УЛТ для контроля изделий с односторонним доступом. Пока в этой нише доминирует вакуумно-пузырьковый способ контроля, который по вполне понятным причинам не удовлетворяет современным требованиям производства (трудоемкость, низкая достоверность контроля). Впечатляет потребность в таком виде контроля для сварных швов судов, общая длина которых составляет для одного судна от 1 до 5 км.

ОРГАНИЗАЦИЯ РАЗРАБОТКИ НОРМАТИВНЫХ МЕТОДИЧЕСКИХ ДОКУМЕНТОВ ПО КОНТРОЛЮ ГЕРМЕТИЧНОСТИ

Наумов В.Н., Тихомиров К.А.
ОАО «НИКИМТ-Атомстрой», Москва, Россия

В связи с развитием межотраслевых и международных связей в своей практической деятельности специалисты по контролю герметичности сталкиваются с необходимостью унифицировать требования к герметичности различных промышленных объектов, к технологиям и системам контроля герметичности на общей нормативной базе на основе единых нормативных документов.

Поэтому в настоящее время целесообразно приступить к разработке нормативных документов устанавливающих общие принципы и характеристики методик, технологий и систем контроля герметичности в связи с требованиями к герметичности различных объектов техники на всех этапах их жизненного цикла (производство, монтаж, эксплуатация, ремонт и т.п.).

Основополагающие требования к нормативному методическому документу по контролю герметичности это единство технической политики в области контроля герметичности, как одного из важнейших показателей качества и безопасности различных объектов, защита интересов потребителей, гармонизация с международными стандартами.

Вместе с тем, в настоящее время, практически отсутствует единый подход и общие принципы формирования требований к герметичности различных объектов и к чувствительности систем их контроля.

В ряде отраслей (атомной, судостроительной, химического машиностроения и др.) применяется система классов герметичности, суть которой – задание норма герметичности объектов через пороговую чувствительность соответствующих систем контроля. По-видимому, это не совсем правильно, тем более что диапазоны пороговой чувствительности в каждом классе задаются через нормализованную величину течей (поток воздуха через течь из атмосферы в вакуум), которые характерны только для вакуумных систем.

В связи с этим целесообразно в нормативные документы заложить принципы обеспечения заданного уровня герметичности объектов, аналогичные принятым в мировом техническом сообществе, основанные на использовании наиболее совершенных, наукоемких методов, технологий и средств контроля герметичности. Причем, в разрабатываемом нормативном документе могут быть созданы предпосылки для гармонизации с европейскими и международными требованиями путем установления взаимосвязи между уровнем качества и уровнем приемки объектов контроля.

Нормы герметичности, устанавливаемые разработчиком объекта контроля и представляемые в виде классов герметичности соответствуют уровню качества, а браковочный уровень, установленный в пределах пороговой чувствительностью системы контроля соответствует уровню приемки. Причем весь реально используемый диапазон пороговой чувствительности систем контроля разбивается на классы чувствительности.

Важным требованием к нормативным методическим документам является использование терминов, однозначно и верно передающей смысл, вкладываемый в текст, обеспечивающих однозначное понимание технических документов заказчиками, разработчиками, изготовителями.

В заключении необходимо отметить, что разработка таких документов требует создания рабочей группы с участием компетентных представителей разработчика, изготовителя и потребителя (заказчика) от заинтересованных отраслей народного хозяйства.

Окончательная редакция может быть выработана на основе консенсуса всех участников рабочей группы.

НЕЙРОСЕТЕВЫЕ АЛГОРИТМЫ ДИАГНОСТИКИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ

Николаева Н.С., Сыряжкин В.И.¹

Томский политехнический университет, г. Томск;

¹Томский государственный университет, г. Томск

Для решения задач диагностики и прогнозирования технического состояния, исследуемых материалов и узлов спутниковой аппаратуры, наиболее перспективным является использование искусственных нейронных сетей. Нейронные сети наилучшим образом проявляют себя там, где имеется большое количество входных данных, между которыми существуют неявные взаимосвязи и закономерности. Они помогают учитывать нелинейные зависимости, что актуально для систем диагностики и прогнозирования. Своевременное обнаружение неисправностей, контроль за состоянием объекта, прогнозирование развития износа позволит уменьшить простои и улучшить работоспособность, как отдельного узла, так и объекта в целом. Рассматриваются трудности, возникающие при построении систем диагностики неисправностей, дается классификация отказов в компонентах системы и структура аналитической модели диагностики отказов. Данная система позволит оптимизировать ремонтные работы путем перехода на ремонт по фактическому состоянию спутниковой аппаратуры.

При создании нейросетевых алгоритмов и системы диагностики материалов и узлов спутниковой аппаратуры решается ряд задач:

1. Задача формализации предметной области, т.е. кодирование, куда включается список обобщенных классов, к которым могут относиться кон-

кретные технические показатели состояния материалов и узлы аппаратуры, а также список признаков, которыми эти объекты в принципе могут обладать.

2. Задача формирования обучающей выборки, т.е. база данных, в которой описаны конкретные данные для аттестации материалов и узлов спутниковой аппаратуры на языке признаков, дополнительно может указываться и их принадлежность к классу.

3. Задача обучения системы диагностики или задача определения состояния объекта. Обучающая выборка используется для формирования базы знаний. Проводится оценка на основе вводимых критериев, благодаря чему можно определить для каждого признака его ценность для диагностики спутниковой аппаратуры в целом. После чего незначительные признаки могут исключены и система диагностики обучена повторно. Данный процесс предполагает итерации.

4. Контроль качества. Контроль обеспечивается вычислением коэффициента, позволяющий определить фактическую среднюю вероятность ошибки по проведению диагностики для материалов и узлов спутниковой аппаратуры.

5. Задача прогнозирования основана на имитационном моделировании и позволяет получить соответствующие количественные оценки выхода из строя спутниковой аппаратуры.

Бортовая аппаратура является одним из наиболее сложных нелинейных объектов управления и диагностирования на сегодняшний день. Высокие уровни нагрузок в акустическом диапазоне частот, а также выхода из строя отдельных элементов системы бортовой аппаратуры вынуждает проектировщиков таких систем прибегать к более корректным решениям вопросов диагностики [1].

Алгоритм диагностирования бортовой аппаратуры с применением искусственных нейронных сетей предусматривает использование карт самоорганизации (selforganizing map) или карт Кохонена. Такие карты характеризуются формированием топографических карт входных образов, в которых координаты нейронов являются признаками входных образов. Так как задачей диагностики является определения неисправностей системы, эти неисправности можно условно представить в виде определенных кластеров на которые должны ориентироваться входные образы.

Алгоритм диагностирования с помощью сети Кохонена включает:

- инициализацию синоптических весов сети в целях корректной работы всей системы;
- вычисление дискриминанта функции для каждого входного образа или входного канала, это необходимо для нахождения центра топологической карты;
- нахождение структуры данной топологической карты;
- процесс синоптической адаптации, предусматривающий корректировку синоптических весов с помощью заложенного алгоритма в целях топологического упорядочивания нейронов.

Использование данного алгоритма в бортовых системах диагностики уменьшит многие рутинные работы, связанные с вычислениями и увеличит экономическую эффективность. А также искусственные нейронные сети увеличивают работоспособность всей системы при выходе из строя отдельных ее элементов и очень устойчивы к различным дрейфам входных и возмущающих факторов, которые действуют на систему.

Нейронные сети достаточно широко используются во многих инженерных областях, но с их использованием также возникают некоторые трудности. Первой проблемой является то, что в большинстве случаев нейронные сети использовались только для работы со статическими процессами. Таким образом, поведение нейронной сети при моделировании нелинейных динамических процессов является достаточно неопределенным и слабо изученным. Вторая трудность заключается в том, что зачастую нейронные сети использовались лишь в качестве классификаторов отказов. Остальные возможности нейронных сетей при этом не использовались. Обычно нейронные сети использовались для определения возможных отказов или других изменений в системе по ее выходам. Такой подход использования только лишь выходов системы для диагностики отказов мог быть корректным для статических систем, но в динамических системах изменение их входов может значительно повлиять на их выходы. Таким образом, такой метод диагностики, который только анализирует выходную информацию, может давать неправильные оценки о состоянии системы в те моменты времени, когда изменяются ее входные характеристики [2].

Нейросетевые алгоритмы, основанные на нейронных сетях, могут менять свое поведение в зависимости от состояния окружающей их среды. После анализа входных сигналов (возможно, вместе с требуемыми выходными сигналами) они самообучаются и обучаются, чтобы обеспечить правильную реакцию. Обученная сеть может быть устойчивой к некоторым отклонениям входных данных, что позволяет ей правильно «видеть» образ, содержащий различные помехи и искажения.

Анализируя возможность программной реализации диагностики бортовой аппаратуры, используем язык MatLab. Для реализации программы выбираем сеть Кохонена. Алгоритм предусматривает самообучение сети и обеспечивает решение задачи автоматической классификации, т.е. отнесение предъявленного вектора входов к одному из образов. В данном случае, это и есть задача диагностирования.

Итоговым результатом обучения являются векторы весов, которые показывают на центры группирования входных образов. Данный алгоритм целесообразнее использовать в среде MatLab, а в частности в специализированном пакете Neural Network Toolbox, который предусматривает 150 различных функций, образуя собой своеобразный макроязык программирования, позволяющий создавать, обучать и использовать самый широкий класс нейросетей.

В целом алгоритм предусматривает следующие действия:

- первичное формирование кластеров путем парного сравнения наиболее различающихся входных сигналов;
- строится обучающая выборка и по ней проводится обучение. Действия повторяются, пока не закончатся все сочетания компонент вектора входных величин;
- для сформированных кластеров строится «эталонный образ» и рассчитывается Евклидово расстояние между этими образами, т.е. формируется новая выборка и проводится обучение сети. Критерием останова является расстояние между «эталонными» образами меньше порогового значения.

Обученная нейронная сеть может с высокой степенью точности предсказать появление дефектов в полупроводниковых приборах и оценить степень их живучести, то есть своевременно вывести технический объект (робота) из зоны опасного воздействия радиации для его ремонта.

Литература

1. **Горева Т.И., Порнягин Н.Н., Пюкке Г.А.** // Вестник Краунц. Физико-математические науки. 2012. № 1(4). С. 31 – 43.
2. **Розенблатт Ф.** Проблема внедрения самообучающихся информационных систем для оценки качества изготовления и функционирования машин и оборудования. Санкт-Петербург, 2004.

НЕЙРОСЕТЕВЫЕ АЛГОРИТМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ПЕРЕСЕКАЮЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ СИСТЕМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Николаева Н.С., Горбачев С.В.¹, Сырямкин В.И.¹,
Богомолов Е.Н., Сунцов С.Б.¹

Томский политехнический университет, г. Томск;
¹Томский государственный университет, г. Томск

Рассмотрим задачи построения и применения формальных операций над числовыми или символьными отображениями объектов реального или идеального мира, результаты, решения которых отражают отношения эквивалентности между этими объектами. Отношения эквивалентности выражают принадлежность оцениваемых объектов к каким-либо классам, рассматриваемым как самостоятельные семантические единицы.

При построении алгоритмов распознавания классы эквивалентности могут задаваться исследователем, который пользуется собственными содержательными представлениями или использует внешнюю дополнительную информацию о сходстве и различии объектов в контексте решаемой задачи. Тогда говорят о «распознавании с учителем» [2]. В противном случае, т.е. когда автоматизированная система решает задачу классификации

без привлечения внешней обучающей информации, говорят об автоматической классификации или «распознавании без учителя». Большинство алгоритмов распознавания образов требует привлечения весьма значительных вычислительных мощностей, которые могут быть обеспечены только высокопроизводительной компьютерной техникой.

На практике исходные данные зачастую обладают сложно формализуемой, неоднородной структурой с заведомо пересекающимися классами образов. Другой проблемой является неполнота обучающей выборки и ее сильная зашумленность. В дискриминантном анализе, например, в случаях неопределенности ответа о принадлежности образа классу образов ответ может быть получен в виде вероятности принадлежности образа каждому из классов образов. Однако описанные выше особенности данных во многих случаях не позволяют построить адекватные вероятностно-статистические модели, что обуславливает создание эмпирических методов и подходов, при разработке которых удобными становятся методы и модели из области мягких вычислений.

Методы нечеткой логики и нейросетевой технологии в настоящее время относятся к перспективным адаптивным технологиям обработки информации и решения задач распознавания и прогноза, позволяющим создавать высококачественные интеллектуальные системы в условиях пересечения объектов анализа [6]. Особенность «нечеткого» представления знаний, а также возможность использования необходимого количества входных и выходных переменных и заложенных диагностических правил позволяют в сочетании с нейросетевой технологией не только повысить точность распознавания, но и вывести логически прозрачные правила интерпретации полученного результата.

Для повышения точности распознавания образов автором предложен комбинированный интенционально-экстенциональный подход, включающий кластерно-конструктивный анализ обобщенных образов на основе нейросетевых карт Кохонена, позволяющих провести кластерное разбиение обобщенных пересекающихся образов (экстенциональный подход), а также построение системы нечеткого логического вывода на основе выявления в выделенных кластерах интегральных характеристик образов (интенциональный подход).

Итак, задача классификации многомерных пересекающихся объектов сводится к нечеткой модификации задачи распознавания образов. Основная идея алгоритма распознавания образов, основанного на нечетких портретах классов образов, заключается в представлении исходной информации о классах в виде их нечетких портретов, которые формируются в результате анализа обучающей выборки [6]. Такие портреты описываются совокупностью лингвистических переменных, соответствующих информативным признакам. Терм-множества этих лингвистических переменных описывают значение признака для каждого из классов образов и строятся в результате анализа частоты встречаемости значений признака в каждом классе обра-

зов. В отличие от метрических алгоритмов распознавания образов, таких, например, как алгоритм k -ближайших соседей или метод потенциальных функций, где в рассмотрение берется каждая точка обучающей выборки, в предлагаемом подходе знания о выборке прецедентов обобщаются. В результате нет необходимости хранить в памяти сведения о всех реализациях обучающей выборки, что дает выигрыш по объему памяти.

На основе анализа выборки прецедентов строится нечеткая система, основанная на лингвистических переменных. База знаний формируется по построенным нечетким портретам. Решение принимается алгоритмом нечеткого логического вывода. Результат работы алгоритма представляется нечетким множеством.

Рассмотрим способ формирования базы знаний. Каждое ее правило соответствует нечеткому портрету класса образов.

ПРАВИЛО « S_1 » :

ЕСЛИ « L_1 есть v_1 » И ... И « L_i есть v_1 » И ... И « L_m есть v_1 » ТО
« \tilde{v}_1 есть V_1 »;

...

ЕСЛИ « L_1 есть v_j » И ... И « L_i есть v_j » И ... И « L_m есть v_j » ТО
« \tilde{v}_1 есть V_j »;

...

ПРАВИЛО « S_k »:

ЕСЛИ « L_1 есть v_k » И ... И « L_i есть v_k » И ... И « L_m есть v_k » ТО
« \tilde{v}_1 есть V_k ».

Принятие решения осуществляется на основе механизма нечеткого вывода. Следует отметить, что в качестве операции «И» на этапе агрегирования используется m -местная логарифмическая функция.

Таким образом, в основу предложенных методов распознавания положены фундаментальные закономерности, характерные для человеческого способа познания вообще. Можно провести аналогию между интенциональными и экстенциональными представлениями знаний и механизмами, лежащими в основе деятельности левого и правого полушарий головного мозга человека. Если для правого полушария характерна целостная прототипная репрезентация окружающего мира, то левое полушарие оперирует закономерностями, отражающими связи атрибутов этого мира. Необходимо особо подчеркнуть, что существование именно этих двух (и только двух) групп методов распознавания: оперирующих с признаками, и оперирующих с объектами, глубоко закономерно. С этой точки зрения ни один из этих методов, взятый отдельно от другого, не позволяет сформировать адекватное отражение предметной области. Поэтому перспективные системы распознавания должны обеспечивать реализацию обоих этих методов, а не только какого-либо одного из них. Компьютерное моделирование демонстрирует эффективность предложенного подхода для решения задач

распознавания пересекающихся образов в условиях сложно структурированных и зашумленных данных.

Литература

1. **Веденов А.А.** Моделирование элементов мышления. М.: Наука, 1988. 192 с.
2. **Горбань А.Н.** Обучение нейронных сетей. М.: Параграф, 1990. 264 с.
3. **Горбань А.Н., Россиев Д.А.** Нейронные сети на персональном компьютере. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1996. 182 с.
4. **Горбачев С.В., Гафуров О.М.** Интеллектуальная картографическая система «ИнформГео»: опыт использования нейроинформационных технологий // Нейроинформатика и ее приложения: материалы VIII Всероссийского семинара, Красноярск, 2000. С. 146 – 148.
5. **Горбачев С.В., Гафуров О.М.** Построение нейросетевой системы управления для решения задачи идентификации геологического тела 3-D // Нейроинформатика и ее приложения: материалы IX Всероссийского семинара, Красноярск, 2001. С. 113–114.
6. **Горбачев С.В., Сырякин В.И., Койнов С.А.** Интеллектуальная система стратегического бизнес-планирования с нечетко-множественной оценкой эффективности и рисков. LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, 2012. 172 с.
7. **Генетические** алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г.К. Вороновский, К.В. Махотило, С.Н. Петрашев и др. Харьков: ОСНОВА, 1997. 112 с.
8. **Поспелов Д.А., Пушкин В.Н.** Мышление и автоматы. М.: Советское радио, 1972. 186 с.
9. **Omhundro S.M.** Efficient Algorithms with Neural Networks Behavior // Complex Systems. 1987. V. 1. P. 273 – 347.
10. **Zadeh L.A.** Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility // Fuzzy Sets and Systems. 1978. V. 1, № 1.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ЭЛЕКТРОВЗОВ

Рафиков Р.Х.

*Ярославский электровозоремонтный завод им. Б.П. Бецева,
г. Ярославль, Россия*

В настоящее время существует множество подходов к решению задач диагностики, с успехом реализованных на практике. Прежде всего, это обусловлено тем, что случающиеся аварии и происшествия на железнодорожном транспорте могут приводить к многочисленным человеческим жертвам, экологическим катастрофам и весьма ощутимым материальным убыткам.

Значение неразрушающего контроля (НК) для обеспечения безопасности перевозок на железнодорожном транспорте трудно переоценить. Ежегодно работниками соответствующих служб российских железных дорог, а также сотрудниками ОАО «Желдорремаш» контролируется более миллионов деталей и узлов подвижного состава, в том числе более тысяч осей колесных пар, в которых обнаруживаются дефекты. К сожалению, используемые в настоящее время технические средства НК таковы, что надежность контроля во многом зависит от состояния, квалификации и ответственности персонала: из общего числа случаев опасного разрушения деталей около 20 % стали следствиями дефектов, пропущенных по вине оператора. Другой проблемой является недостаточная производительность ручного контроля. Автоматизация средств НК приобретает особую актуальность в условиях наметившегося оживления экономики России, когда с увеличением общего объема перевозок постоянно возрастает потребность в подвижном составе. Вопрос об оперативном и дифференцированном подходе обнаружения дефектов колесных пар до сих пор остается открытым.

Своевременное выявление неисправностей при заводском ремонте тягового подвижного состава позволяет предотвратить тяжелые последствия их развития до поломки и выхода из строя ответственных узлов и деталей, создающих угрозу безопасности движения. Кроме того, это способствует сокращению расходов на техническое обслуживание и ремонт, экономии энергоресурсов, потребляемых на тягу поездов, сведению к минимуму задержек в движении, уменьшению нарушений графика движения поездов, сбою ритма перевозочного процесса, значительным потерям пропускной способности, а также уменьшению износа конструктивных элементов пути и подвижного состава.

Причина разрушений колесных пар, – это наличие дефектов в элементах колесных пар, которые можно разделить на дефекты, появляющиеся при изготовлении элементов колесных пар и дефекты, возникающие в процессе эксплуатации.

Анализ состояния неразрушающего контроля на ЯЭРЗ за 9 месяцев 2013 г. показал, что за текущий период дефектоскопистами ОНК на заводе различными методами НК было проконтролировано 143 926 шт. деталей и узлов локомотивов, забраковано 542 шт., что составило 0,38 %. За аналогичный период 2012 г. было проконтролировано 144 509 шт. деталей и узлов локомотивов, забраковано 493 шт., что составило 0,34 %. Обобщенные данные о дефектности основных деталей электровозов за 9 месяцев 2013 г. представлены в табл. 1. Для ремонтных осей колесных пар электровозов характерна браковка по прозвучиваемости металла¹. Из проконтролирован-

¹ Проверка осей на «прозвучиваемость» – значит проверить, удовлетворяет ли данная ось норме по затуханию ультразвука.

ных 1530 осей за 9 месяцев 2013 г. забраковано 13 шт. (ЧС-7 – 3шт.; ЧС-2 – 2 шт.; ЧС-6 – 4шт.; ВЛ-10 – 1шт.; 2ТЭ-116-1шт.; ТЭП-70 – 2шт.), что составляет 0,85 %.

Валы тяговых электродвигателей ЭД-118 бракуются по результатам магнитопорошкового и ультразвукового контроля из-за наличия трещин на гантельных переходах вала (проконтролировано 1140 шт., забраковано – 63 шт., что составило 5,53 %).

Подвесные болты в основном бракуются из-за наличия трещин в резьбовых соединениях.

Карданные валы бракуются по результатам магнитопорошкового контроля по причине трещин в шлицевой части вала (проконтролировано 688 шт., забраковано – 9 шт., что составило 1,31 %).

1. Обобщенные данные о дефектности основных деталей электровозов за 9 месяцев 2013 г.

№ п/п	Наименование контролируемой детали, узла	Проверено деталей, шт.	Забраковано деталей, шт.	Процент брака, %
1	2	3	4	5
1	Ось колесной пары ремонтная	1530	13	0,85
2	Зубчатое колесо	1796	145	8,07
3	Шестерня	574	9	1,57
4	Удлиненная ступица	458	28	6,11
5	Колесный центр	3419	46	1,35
6	Ролики подшипников	37833	18	0,05
7	Валы тяговых двигателей	1140	63	5,53
8	Карданный вал	688	9	1,31
9	Кольца подшипников	3718	11	0,30
10	Подвесной болт	1326	102	7,69
11	Серьга рессорного подвешивания	812	21	2,59
12	П-образный подвес	549	21	3,83
13	Захват	288	26	9,03

Наиболее часто бракуемыми деталями остаются зубчатые колеса (проконтролировано 1796 шт. из них забраковано 145 шт.), что составляет 8,07 % от общего количества. Для сравнения с прошлым 2012 г. из проконтролированных 1938 шт. забраковано 106 шт., что составляет 5,47 % от общего количества.

В условиях завода возникает задача, для оперативного контроля без предварительных подготовительных работ (разборка, мойка и т.д.) колесных пар, снятых с электровозов, а также обеспечение доступа оператора к труднодоступным участкам деталей и узлов при контроле. Наличие в технологическом процессе оборудования для автоматического контроля колесных пар, без предварительной подготовки, направлено на повышение качества ремонта электровоза. Контроль колесной пары, а именно колесных дисков, зубчатого колеса и вала затрудняется наличием труднодоступных зон для контроля.

Основной задачей является разработка способа контроля труднодоступных зон колесной пары, а также математическое моделирование взаимодействия вихретокового преобразователя (ВТП) с труднодоступными зонами контроля колесных пар.

Предлагаемый способ контроля должен обеспечивать: выявление эксплуатационных дефектов требуемых размеров, значительное снижение трудоемкости контроля в стадии ремонта колесных пар, повышение надежности контроля за счет исключения влияния человеческого фактора, повышение информативности контроля и возможность документирования результатов контроля.

Литература

1. **Гундорова Е.П.** Технические средства железных дорог: учебник для техникумов и колледжей ж.-д. транспорта. М.: Маршрут, 2003. 496 с.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ЭТАНОЛАМИНОВ

Сажин С.Г., Пенкин К.В.

*Дзержинский политехнический институт (филиал)
Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева, г. Дзержинск, Нижегородская область, Россия*

Рассматривается задача мониторинга безопасности потенциально опасного процесса синтеза этаноламинов. Этот процесс является одной из стадий процесса получения этаноламинов.

В основу производства положена технология получения этаноламинов из окиси этилена и аммиака с использованием продуктов реакции – этано-

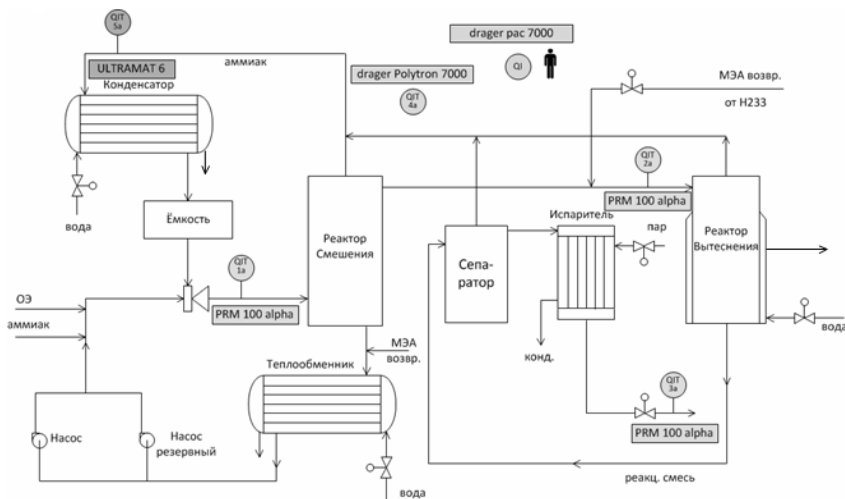


Рис. 1. Технологическая схема процесса синтеза этаноламинов с приборами контроля безопасности

ламинов в качестве катализаторов основной реакции. Все стадии технологического процесса решены по непрерывной схеме.

Технологический процесс использует реакцию оксиэтилирования аммиака, в которой аммиак реагирует с окисью этилена и происходит образование моно-, ди- и триэтаноламинов. Кроме основных реакций в условиях синтеза возможно протекание реакции оксиэтилирования триэтаноламина. Технологическая схема процесса изображена на рисунке 1.

Синтез этаноламинов осуществляется в безводной среде с использованием продукта реакции моноэтаноламина в качестве катализатора. Процесс проводится в двух реакторах: реакторе смешения и реакторе вытеснения, работающих при мольном избытке аммиака. Основные реакции синтеза проводится в циркуляционном контуре, состоящем из ректора смешения, двух насосов (основной и резервный) и теплообменника. В трубопровод циркуляционного контура, на вход теплообменника подается циркуляционный МЭА (моноэтаноламины). Реакционная смесь из реактора смешения поступает в реактор вытеснения (далее будем его называть буферный реактор), подогреваемый горячей водой или паром через рубашку. В буферный реактор поступает также возвратный МЭА с насоса. Из буферного реактора реакционная смесь поступает через сепаратор в испаритель, работающий при одном и том же давлении с реактором. Аммиак, испаренный из основного и буферного реактора и испарителя, конденсируется в теплообменнике и через емкость посредством эжектора возвращается в циркуляционный контур синтеза. Давление в реакторном блоке – 3,0 – 4,0 МПа, температура

в реакторе 60 – 80 °С, а в испарителе 100 – 120 °С. Обогрев реактора производится горячей водой, а в испаритель подается пар $P = 1,3$ МПа.

Всвязи с неплотностью трубной арматуры либо возможной негерметичностью насосов, возможно выделение в воздух рабочей зоны аммиака. Аммиак NH_3 (нитрид водорода), при нормальных условиях — бесцветный газ с резким характерным запахом. Аммиак почти вдвое легче воздуха, ПДК рабочей зоны 20 мг/м^3 – II класс опасности (высокоопасные вещества) по ГОСТ 12.1.007. По физиологическому действию на организм аммиак относится к группе веществ удушающего и нейротропного действия, способных при ингаляционном поражении вызвать токсический отёк лёгких и тяжёлое поражение нервной системы. Запах аммиака ощущается при концентрации 37 мг/м^3 , а предельно допустимая концентрация 20 мг/м^3 . В данном процессе необходимо обязательно осуществлять непрерывный контроль за данным веществом.

Прежде всего, нужно контролировать нормальный ход процесса синтеза, т.е. состав смеси поступающей на вход обоих реакторов и состав смеси после прохождения через сепаратор и испаритель. Чтобы это осуществить можно использовать промышленные проточные рефрактометры *PRM-100*. Чтобы быть уверенным, что испаренный аммиак из реакторов и сепаратора весь доходит до конденсатора, где он конденсируется и возвращается в процесс, будем использовать непрерывный инфракрасный газоанализатор фирмы Siemens *ULTRAMAT 6* на входе в конденсатор. Для обнаружения в воздухе рабочей зоны паров аммиака будем пользоваться детектором газов *Dräger Polytron 7000*. Работники, которые обслуживают данный процесс либо находятся по долгу службы в непосредственной близости к нему, и используют персональный карманный газоанализатором *Dräger Pac 7000*. Расположение приборов контроля показано на рисунке 1.

Все выбранные приборы, за исключением *Dräger Pac 7000*, имеют унифицированный выходной сигнал 4 – 20 мА, что позволяет создать систему автоматизированного управления и мониторинга процесса синтеза аммиака на базе микропроцессорного контроллера и компьютера. Сбор и обработка информации происходит в контроллере по каналам аналогового ввода. Значения концентрации анализируемых веществ и газов будет передаваться через промышленную сеть Industrial Ethernet на компьютер (станцию оператора). Связь процесса с оператором достигается с помощью разработанной программы визуализации. С помощью этой программы оператор может наглядно увидеть реальное значение концентрации аммиака в разных точках отбора технологического процесса, а также его концентрацию в области рабочей зоны. Отметим, что в программе контроллера должна быть заложена программа аварийной остановки всего процесса получения этаноламов при превышении в воздухе ПДК и/или обнаружении утечки из трубопровода аммиака. Система обработки выходной информации показана на рисунке 2.

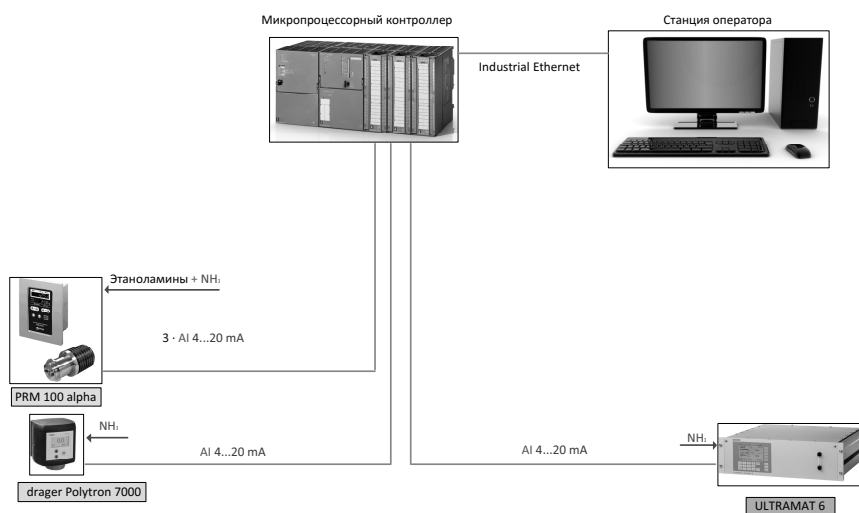


Рис. 2. Система обработки выходной информации

Таким образом, в работе был проведен экологический мониторинг процесса синтеза этаноламинов с использованием промышленных анализаторов газа и растворов.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ НА ОБЪЕКТАХ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ (ГАЗОПОТРЕБЛЕНИЯ)

Сажин С.Г.¹, Сумкин П.С.², Моисеев Ю.Н.², Гребеньков П.М.²
¹НГТУ им. П.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия;
²МГУПИ, Москва, Россия

В технике течеискания, для опасных производственных объектов (ОПО) – систем газораспределения, как систем (сосудов) работающих под давлением, важное значение играет критерий – условие безопасности персонала неразрушающего контроля (НК) при проведении испытаний на прочность и герметичность, что накладывает дополнительные требования к системам защиты персонала НК от возможного взрыва и поражения осколками (наличие бронешитов на участках проведения испытаний).

Согласно [1 – 4] испытания газопроводов на герметичность проводят манометрическим методом контроля герметичности. Недостатком манометрического метода контроля герметичности.

1. Значения испытательного давления и примерный радиус разлета осколков при авариях стальных подземных и надземных газопроводов

№	Рабочее давление газа, МПа	Испытательное давление, МПа	Продолжительность испытаний, ч	Примерный радиус разлета осколков при авариях во время испытаний на герметичность, м
1	До 0,005	0,6	24	4
2	Св. 0,005 до 0,3	0,6	24	4
		1,5	24	25
3	Св. 0,3 до 0,6	0,75	24	6,2
		1,5	24	25
4	Св. 0,6 до 1,2	1,5	24	25
	Св. 0,6 до 1,6 для резервуаров	2,0	24	44

метрического метода контроля герметичности (способа контроля по падению давления) является отсутствие локализации точного места дефекта, что существенно снижает возможности дальнейшего диагностирования и ремонта. При этом, методика контроля герметичности должна однозначно определять безопасное расстояние контроля исключающее поражение специалистов НК. Радиус разлета осколков при взрыве трубопроводов (ряд случаев отражен в [7]), определяется согласно [6]:

$$R_{\text{оск}} = 15,3p^2, \quad (1)$$

где $R_{\text{оск}}$ – радиус разлета осколков при взрыве трубопроводов, м; p – давление в трубопроводе, МПа (в момент разрыва).

В качестве предполагаемого решения можно выбрать следующие методы (системы контроля герметичности):

- акустико-эмиссионный контроль;
- контроль с использованием акустического газового метода.

В качестве недостатков акустико-эмиссионного контроля можно выделить: невозможность контроля герметичности вентилях и задвижек, необходимостью применения аппаратуры АЭ с большим числом каналов для обеспечения требуемого времени контроля (экономическими показателями), невозможностью нарушения трубной изоляции при эксплуатационном контроле. Применение акустического газового метода компенсирует большинство из перечисленных недостатков (рис. 1). Так, например, в [8] пред-

ложено использование акустического течеискателя при проведении комплексного диагностирования трубопроводов и оборудования газораспределительных станций магистральных трубопроводов. Однако, отсутствие контрольных образцов для акустического газового метода, как средств проверки работоспособности акустических течеискателей не позволяет надежно (т.е. с наличием браковочного признака) применять их при проведении контроля герметичности сетей газораспределения, согласно [5] заключение по результатам контроля герметичности, вследствие этого, не выдается.

Необходимо также отметить, что сама методика проведения контроля в [8] не обеспечивает безопасности проведения контроля для специалистов НК. Методика контроля герметичности должна однозначно определять безопасное расстояние контроля с помощью акустического течеискателя, исключая поражение специалистов НК. Это безопасное расстояние должно являться главным критерием при разработке контрольных образцов (расстояние от щупа ультразвукового течеискателя до точки истечения пробного газа контрольного образца), обеспечивающих проверку нижнего порога чувствительности и работоспособности средств контроля герметичности.

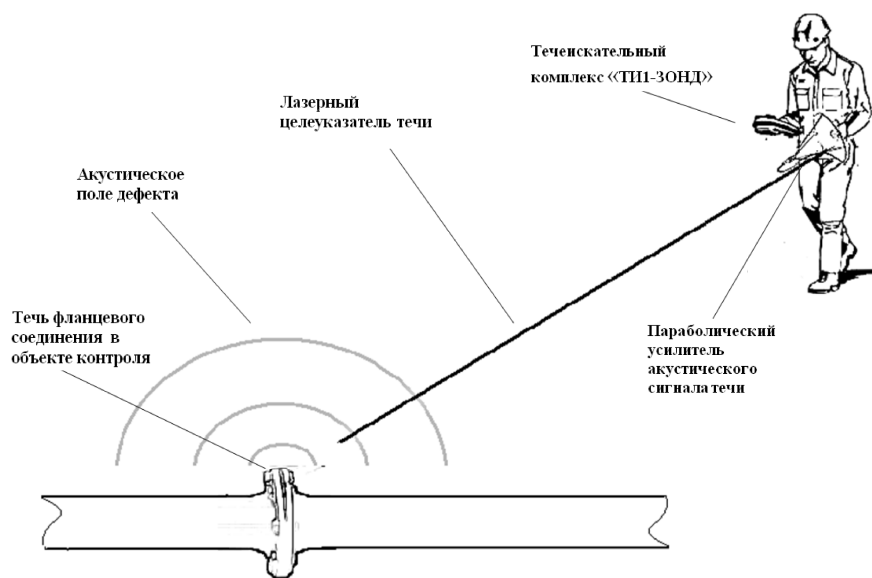


Рис. 1. Схема поведения контроля герметичности способом акустического щупа течеискательного комплекса «ТИ1-ЗОНД» с помощью параболического усилителя акустического сигнала

Выводы

Таким образом, для повышения надежности и эффективности контроля герметичности (достоверной локализации мест утечек с последующим ремонтом) объектов газораспределения (газопотребления) требуется разработка не только контрольных образцов, но и методик контроля, включающих их настройку, калибровку и применение согласно правил безопасности проведения испытаний. Определение требований к указанному контрольному образцу само по себе представляет довольно сложную техническую задачу, для решения которой необходимы знания не только технологий течеискания, но и анализ большого количества нормативных документов определяющих порядок сооружения объектов газового надзора [9, 10].

В настоящей статье определены современные требования к контрольному образцу для проведения контроля герметичности с использованием акустического течеискателя и пробного газа воздуха, определены нормативные документы, руководствоваться которыми необходимо при разработке данного контрольного образца.

Литература

1. **СНиП 42-01-2002.** Строительные нормы и правила Российской Федерации. Газораспределительные системы.
2. **ГОСТР 53402-2009.** Арматура трубопроводная. Методы контроля и испытаний.
3. **ГОСТ 9544-93.** Арматура трубопроводная запорная. Нормы герметичности затворов.
4. **ВРД 39-1.10-069-2002.** Положение по технической эксплуатации газораспределительных станций магистральных газопроводов.
5. **СДОС-07-2012.** Методические рекомендации о порядке проведения контроля герметичности, технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах.
6. **РД 26-12-29-88.** Правила проведения пневматических испытаний изделий на прочность и герметичность.
7. **Красных Б.А., Мартынюк В.Ф., Сергиенко Т.А., Сорокин А.А., Феоктистов А.А., Нечаев А.С.** Анализ аварий и несчастных случаев на объектах газового надзора: учебное пособие. М.: ООО «Анализ безопасности», 2003. 255 с.
8. **СТО ГАЗПРОМ РД 1.10-098-2004.** Методика проведения комплексного диагностирования трубопроводов и обвязок технологического оборудования газораспределительных станций магистральных газопроводов.
9. **Сумкин П.С., Моисеев Ю.Н.** Анализ способов контроля герметичности на объектах газораспределения и пути повышения их эффективности // Газовая промышленность. 2013. № 6. С. 58 – 76.

10. **Сумкин П.С., Моисеев Ю.Н.** Контрольные образцы, применяемые в процессе течеискания на опасных производственных объектах и анализ их использования для калибровки акустического метода контроля герметичности // Стандартные образцы в измерениях и технологиях: тезисы докладов 1-ой международной научной конференции, Екатеринбург, 2013. С. 156 – 160.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА ГЕРМЕТИЧНОСТИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОБЪЕКТОВ

Сажин С.Г., Тараненко Е.В., Мясников В.М.

*Дзержинский политехнический институт Нижегородского
государственного технического университета им. Р.Е.Алексеева,
Дзержинск, Россия*

Большинство современных технологических процессов в атомной, химической нефтехимической, биологической и в др. отраслях промышленности связаны с использованием множества потенциально опасных сред. Это могут быть взрывопожароопасные, высокотоксичные, ядовитые, радиоактивные и т.п. вещества. Разгерметизация технологических объектов и их элементов (оборудования и коммуникаций) содержащих такие среды приводит к созданию аварийных и катастрофических ситуаций с тяжелыми последствиями.

Контроль герметичности различных крупногабаритных объектов атомной промышленности: энергетических установок, транспортных систем и систем хранения энергоресурсов играет первостепенную роль в части обеспечения их безопасности и экологичности. Одним из наиболее ответственных элементов плавучих и наземных атомных паропроизводящих установок (АППУ), служащим последним барьером на пути распространения радиоактивных выбросов в окружающую среду, является защитная оболочка (ЗО) выполняющая в аварийных ситуациях функции локализирующей системы безопасности

В соответствии с требованиями Российского морского регистра судоходства утечка воздуха из ЗО не должна превышать 1 % от ее объема в сутки при максимальном проектном расчетном давлении 0,4 МПа. Учитывая важность ЗО необходимо обеспечить контроль герметичности как при изготовлении, так и постоянный непрерывный контроль во время эксплуатации АППУ.

Внутренний объем ЗО АППУ герметично разделен на аппаратное и реакторное помещения, объемом несколько сотен кубических метров. При эксплуатации в помещениях ЗО поддерживается небольшое постоянное разрежение воздуха до 400 Па относительно окружающих помещений.

Контроль герметичности ЗО это многоэтапный процесс. Во первых, предварительно контролируются все составные конструкции ЗО. Основное испытание ЗО на герметичность производится до загрузки топлива в АППУ. После загрузки должно быть произведено контрольное испытание ЗО на герметичность пониженным избыточным давлением. В период эксплуатации испытания ЗО на герметичность должны проводиться периодически в течение всего срока.

К основным элементам ЗО, в которых при изготовлении и при эксплуатации АППУ может быть нарушена герметичность, относятся разъемные, фланцевые и сварные соединения, запорная и предохранительная арматура, кабельные вводы и т.п. Для обеспечения герметичности, как при изготовлении, так и при эксплуатации некоторые из перечисленных элементов снабжаются специальными устройствами для облегчения их контроля герметичности, например, контрольными полостями. Контрольные полости не только повышают герметичность и надежность соединений, но и дают возможность проводить испытания этих элементов без опрессовки всей ЗО. Но, такие решения очень трудоемки и не позволяют судить об интегральной (общей) герметичности ЗО в режиме мониторинга в процессе эксплуатации.

При рассмотрении методов контроля герметичности с учетом требований и условий работы ЗО можно выделить два метода — масс-спектрометрический и манометрический.

Для контроля ЗО реализация масс-спектрометрического метода возможна камерными способами. Так, как способы щупа и обдува применяют для локализации течей (обнаружения мест их расположения) и для систем мониторингового контроля герметичности трудно осуществимы.

ЗО АППУ имеет сложную, больших размеров конструкцию. Создать вокруг нее камеру или покрыть чехлом невозможно. Но снаружи ЗО окружена защитным ограждением, роль которого выполняют различные по назначению наружные помещения. При подаче в них пробного газа гелия в концентрации 3-10 %, можно зафиксировать возможные натекания в объем ЗО с помощью отборного устройства масс-спектрометрического течеискателя, установленного в вентиляционную систему откачки воздуха из ЗО. Для повышения чувствительности испытаний возможен режим накопления, когда на некоторое время отключается система откачки (вентиляции) ЗО. При поочередной подаче пробного газа гелия в отдельные помещения можно реализовать способ местных камер и определить зону натекания. Однако, все эти операции вызывают конструктивные доработки ЗО и защитного ограждения. Анализируя возможности и условия применения масс-спектрометрического метода течеискания для контроля ЗО можно сделать вывод о существенных проблемах связанных с его внедрением и применением в режиме мониторинга.

Манометрический метод один из самых доступных в реализации методов контроля герметичности. Его применение не требует сложного технологического оснащения и оборудования, отличается простотой при незначительных затратах труда. Камерные способы манометрического метода для контроля герметичности ЗО вряд ли применимы по той же причине, что и при масс-спектрометрическом методе течеискания (большие габариты объекта).

В период строительства ЗО на различных этапах ее формирования испытывается на герметичность внутренним избыточным давлением и возможные утечки в окружающую атмосферу контролируются бескамерным (компрессионным) способом по падению давления. Для испытаний ЗО в процессе эксплуатации в режиме мониторинга такой способ не приемлем, т.к. давление внутри ЗО ниже атмосферного.

Способ повышения давления (вакуумный) отличается от предыдущего тем, что вместо избыточного давления в ЗО создается разрежение (вакуум), и при натекании воздуха из атмосферы абсолютное давление в ЗО будет повышаться.

Отдельно следует выделить дифференциальный способ (сравнения). По этому способу одновременно создают давление (или разрежение) в контролируемом объекте и в заведомо герметичном вспомогательном объекте (эталоны). После перекрытия источника давления и выдержки в течение определенного времени определяют перепад давлений, возникающий в случае утечки. При этом результаты воздействия внешних факторов на контролируемый и вспомогательный объекты во многом взаимно уравниваются, хотя и не полностью.

В идеале вспомогательный объект должен быть идентичен контролируемому объекту – ЗО (объем, конструкция, материалы и т.д.) и находиться в тех же условиях (температура, давление, влажность и т.д.). Но это трудно осуществимо. Дифференциальный способ обеспечивает намного большую чувствительность испытаний ЗО по сравнению со способом повышения давления, т.к. может быть применен дифференциальный манометр с небольшим пределом измерения перепада давления и, следовательно, с более высокой чувствительностью и точностью.

При проведении манометрических испытаний особо следует учитывать влияние температуры контролируемого объекта и воздуха окружающей среды, изменение атмосферного давления и влажности, изменение объема объекта (например, вследствие его недостаточной жесткости), дросселирования нагнетаемого воздуха, длительность интервала времени выравнивания давления при опрессовке и др. Эти факторы могут внести существенные погрешности в результаты измерений, особенно при больших выдержках времени.

Температура и давление в таких больших и сложных объектах как ЗО изменяются произвольно как во времени, так и в пространстве. Учет этих

параметров осуществляется установкой в разных частях ЗО высокоточных датчиков температуры и давления. Для уменьшения влияния температуры вспомогательный объект выполняют из материала с высоким коэффициентом теплопроводности и помещают внутри ЗО.

При дальнейшем совершенствовании манометрического метода учета влияния изменения температуры и давления на результаты контроля, безусловно, принадлежит ведущая роль. В последние годы в связи с развитием техники высокоточного измерения малых изменений давления и температуры, а также современных средств обработки информации возможности метода расширяются. При этом одной из тенденций в разработке способов контроля герметичности является изыскание дополнительных информативных параметров при определении величины негерметичности.

На основании проведенного анализа предложен дифференциальный способ мониторинга герметичности ЗО, основанный на оценке изменения параметров воздуха. Основные особенности способа рассматриваются в докладе.

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Тихомиров К.А., Наумов В.Н.
ОАО «НИКИМТ-Атомстрой», Москва, Россия

Контроль герметичности один из основных и ответственных видов неразрушающего контроля при разработке изделий связанных с радиационно-опасными, токсичными материалами, а также других опасных производственных объектов. От герметичности подобных объектов зависят эффективность и безопасность системы их создания и эксплуатации. Высокий уровень требований к герметичности материалов и конструкций таких объектов иллюстрируется величиной выявляемых в процессе контроля герметичности сквозных дефектов, достигающей 10 нанометров (I класс герметичности).

Наиболее актуальной и сложной проблемой контроля герметичности вышеуказанных объектов является строгое соблюдение методик контроля, обеспечение объективности и достоверности выявления сквозных дефектов, предотвращение воздействия опасных факторов на организм человека.

С целью выполнения всех вышеуказанных требований к системам контроля нами была реализована концепция дистанционности и максимальной автоматизации систем контроля герметичности.

На примере результатов разработанных ОАО «НИКИМТ-Атомстрой» дистанционно-управляемых, автоматизированных установок контроля гер-

метичности обоснованы преимущества применения автоматизированных систем.

В качестве примеров автоматизированных систем приводятся:

- установка контроля герметичности замыкающих соединений пеналов (контейнеров) после загрузки в них ОЯТ, которая позволяет контролировать герметичность и определять места течей масс-спектрометрическим методом по IV классу герметичности;

- установки контроля герметичности твэлов с МОКС-топливом в пучке и в составе ТВС, которые позволяют проводить контроль суммарной герметичности масс-спектрометрическим методом по I классу герметичности;

- установка автоматизированного контроля герметичности уплотнений универсального комплекта хранения УКХ, которая позволяет осуществить высокочувствительный контроль УКХ (контейнеров) после загрузки в них РАО и ОЯТ манометрическим методом с дифференциальной системой измерения давления;

- система выявления мест течей в сварных швах облицовки стен и пола бассейна выдержки АЭС без его разгрузки и слива рабочей жидкости – раствора борной кислоты;

- автоматизированная установка удаления воздуха из пенала после его загрузки и заполнения его азотно-гелиевой смесью перед контролем герметичности.

Системы управления с элементами робототехники обеспечивают в автоматизированном режиме работу установок в соответствии с заданным алгоритмом, разработанным согласно методике контроля, без вмешательства оператора с автоматической обработкой и архивированием результатов контроля.

Подобная концепция разработанных систем контроля позволила исключить ошибки оператора при проведении контроля и повысила надежность выявления сквозных дефектов, в том числе по I классу герметичности (с потоком через сквозные дефекты порядка $1 \cdot 10^{-11}$ м³·Па/с).

Электронное архивирование результатов контроля позволяет проводить анализ качества выпускаемой продукции, ее мониторинг и разработку решений по продлению сроков эксплуатации.

За счет применения дистанционных подсистем управления процессами контроля полностью исключена необходимость работы оператора непосредственно с объектом контроля. Применяемая течеискательная аппаратура обеспечивает работу в режиме удаленного доступа до 100 м от объекта контроля.

Разработанные системы могут быть встроены в автоматизированные комплексы производства изделий с применением высокоточного оборудования и поточных линий.

ТЕСТ-ОБЪЕКТ С ОДИНОЧНЫМ ДЕФЕКТОМ ПРОТИВ МОНИТОРА СИСТЕМЫ КАПИЛЛЯРНОГО КОНТРОЛЯ

Филинов М.В.

ООО «НПК «МИКРОКОН», Москва, Россия

Отечественными специалистами по капиллярному контролю часто обсуждается вопрос о взаимной заменимости отечественных тест-объектов с одиночным дефектом (ТОД) и класса зарубежных тест-объектов, называемых мониторами системы капиллярного контроля (или просто мониторами) типа PSM-5 или тест-панели по EN ISO 3452-3. В настоящем докладе даются рекомендации по такой замене, а также рассматриваются ограничения и возможности каждого из видов тест-объектов для определения общей чувствительности процесса капиллярного контроля и выявления ухудшения параметров процесса, влияющих на общую чувствительность метода.

Отечественные ТОД изначально были предназначены для контроля и сравнения чувствительности наборов средств капиллярного контроля и относятся к классу компараторов. ТОД представляют собой металлическую полосу со специальным образом термически, химически и механически обработанной поверхностью. На этой поверхности механически или термомеханически создается одиночный тупиковый дефект типа протяженной поперечно полосе трещины. ТОД имеет шероховатость механической обработки по всей поверхности, включая зону дефекта.

Мониторы системы, точнее – процесса, капиллярного контроля изначально были разработаны для определения общей чувствительности метода. Монитор PSM-5 или панель по EN ISO 3452-3 представляют собой пластину из нержавеющей стали, на одной из половин которой нанесены пять искусственных дефектов соответственно пяти уровням чувствительности, а другая половина представляет собой либо поле однородной шероховатости (монитор PSM-5), либо набор полей шероховатости (панель по EN ISO 3452-3). Монитор демонстрирует, что все элементы процесса капиллярного контроля – как расходные материалы, так и оборудование – работают правильно, и выдерживаются все временные интервалы.

Монитор проходит весь процесс как обычное изделие. Заключение о работоспособности и стабильности всего процесса и его элементов дается по различию в индикациях панели от теста к тесту и состоянию полей шероховатости. Число выявленных звездообразных дефектов дает уровень чувствительности процесса капиллярного контроля. Монитор сигнализирует о внезапном изменении качества процесса капиллярного контроля. Под качеством процесса [4] понимается способность к надежному и воспроизводимому обнаружению дефектов на тест-объекте с известными дефектами. Если система не может продемонстрировать воспроизводимость, ее следует считать ненадежной.

ТОД имеет ряд ограничений при определении чувствительности процесса капиллярного контроля. При единственном дефекте известного размера, чувствительность определяется только по принципу «да-нет» – достигнут паспортный уровень чувствительности или нет. Точно уровень чувствительности процесса можно в этом случае определить, лишь сделав множество проходов с тест-объектами разного паспортного уровня чувствительности. При этом из-за того, что дефектность процесса определяется по нескольким тестам на одном и том же объекте, ТОД каждого уровня чувствительности должен проходить несколько раз. Это влечет существенно большие затраты времени по сравнению с использованием монитора – во столько раз, сколько ступеней чувствительности нужно проверить. Между проходами тест-объект необходимо подвергать тщательной очистке и тщательной сушке, что также требует времени.

Второй особенностью ТОД является отсутствие полированного поля. Это может дать неадекватную информацию о смываемости пенетранта, так как пенетрант, в процессе контроля нормально смывающийся с гладких деталей, может дать совершенно противоположную картину на поверхности ТОД.

Для этой задачи применяют тест-объект по EN ISO 3452-3, который не только отобразит достижимый уровень чувствительности процесса, но и предоставит данные о том, до какого уровня шероховатости смываемость пенетранта остается на приемлемом уровне.

Выводы

Тест-объект с одиночным дефектом может заменять мониторы системы капиллярного контроля PSM-5 и EN ISO 3452-3 при оценке чувствительности процесса капиллярного контроля.

Но имеются и важные ограничения, которые обязательно нужно принимать во внимание при такой замене:

- ТОД работает лишь как *пороговое* средство оценки чувствительности, в то время как монитор системы капиллярного контроля PSM-5 дает *точную* пятибалльную оценку достижимой чувствительности;

- Мониторы по EN ISO 3452-3 и PSM-5 с полем шероховатости дает представление о том, насколько дефекты работы линии капиллярного контроля проявляются сильнее в зависимости от шероховатости поверхности объекта; тест-объект с одиночным дефектом такой информации не дает.

- ТОД, как и монитор PSM-5, показывает смываемость пенетранта лишь для одного некоторого среднего значения шероховатости. Если важна точная оценка смываемости, необходимо использовать монитор по EN ISO 3452-3 с клином полей шероховатости.

– Для общей и наиболее полной оценки достижимого уровня чувствительности процесса и качества работы системы с возможностью получения максимального количества индикаторов неисправностей процесса капиллярного контроля лучше всего подойдет монитор системы капиллярного контроля по EN ISO 3452-3.

Литература

1. **ГОСТ 18442–80.** Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования.
2. **Прохоренко П.П., Филинов М.В.** Физические основы и средства капиллярной дефектоскопии. М.: Издательство физико-математической литературы, 2008. 308 с.
3. **Nondestructive Testing Handbook.** Second Edition. Volume Two. Liquid Penetrant Tests / By Robert C. McMaster (Editor) – American Society For Nondestructive Testing, 1982. 615 p.
4. **Филинов М.В.** Капиллярный контроль. В кн.: Неразрушающий контроль. Справочник в 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2004. Т. 4. Кн. 3.
5. **Vasquez I.** Fluorescent Penetrant Inspection System Performance Test Using Known Defect Standards [Electronic resource]. 1997. Mode of access: <http://www.asnt.org/publications/materialseval/basics/dec97basics/dec97basics.htm>

СЕКЦИЯ 7. МЕТОДЫ НК И ТД ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА

Руководители секции: Махутов Н.А., Матвеев В.И.

ПРОВЕДЕНИЕ НК НДС ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

Батов Г.П., Ермолаев А.А., Копытов С.Г.
ООО «НУЦ «Качество», Москва, Россия

Введение

Метод контроля напряженного состояния материала, как один из основных методов неразрушающего контроля, был введен в 2005 г. в ISO 9712 (Неразрушающий контроль квалификация и сертификация персонала) и документы СДСПНК РОНКД.

В 2007 г. ООО «НУЦ «Качество» был первым центром на территории РФ, который начал проводить подготовку и сертификацию персонала НК напряженно деформированного состояния, в соответствии с требованиями ISO 9712 и СДСПНК РОНКД. За прошедшие 6 лет работы, есть возможность оценить результаты нашего труда, и проанализировать проведение работ на реальных объектах специалистами, прошедшими подготовку и сертификацию в нашем центре.

В последние годы, в связи с большим количеством опасных производственных объектов, отработавших свой расчетный ресурс, и нуждающихся прохождении процедуры оценки остаточного ресурса потребность в специалистах проводящих НК НДС существенно возросла, и в ряде случаев работы по НК НДС стали поручать специалистам не прошедшим соответствующую подготовку и аттестацию.

Главным отличием подготовленного и аттестованного специалиста, является то, что он в большинстве случаев может понять, что измерение проведено не правильно, и использовать полученные данные нельзя. Так же он может выявить влияющие факторы и грамотно провести отстройку аппаратуры.

Что бы понять какой вред может нанести специалист, который не может оценить правильность результата измерения напряженного состояния, можно сравнить, например, с обычным неразрушающим ультразвуковым контролем, когда специалист получает дефект площадью большей, чем сечение объекта, спокойно протоколирует его размер, и у него не возникает вопроса, как такое может быть?

Наиболее частыми и вопиющими ошибками является установка на деформированный участок систем тэнзометрического мониторинга, и принятие текущего состояния объекта за ненагруженное, неправильная установка и монтаж систем мониторинга, нарушение процедуры тарировки аппаратуры для структурно зависимых методов НК НДС (таких как метод шумов Баркгаузена и др.).

Использование не тарированной аппаратуры носит систематический характер, это связано не только с непониманием операторами важности тарировки и общим пренебрежением к процедуре контроля, а еще и с не возможностью добыть образцы из того же материала, что и объект контроля. Так как добыть кусок того же материала из которого был сделан котел 30 лет назад и претерпевший всю ту же историю перегревов и деформаций невозможно. Вырезка образца из объекта контроля так же затруднительна.

К сожалению даже адекватно подготовленный (с нашей точки зрения) специалист в полевых условиях испытывает существенные затруднения. В полевых условиях контроля меняются не только форма объекта, удобства доступа и подготовка поверхности, но и появляются новые ранее не изученные факторы, влияющие на результаты НК НДС. Помимо объекта контроля меняются и климатические условия, влажность, температура, электромагнитные помехи. Вплоть до того, что дорогостоящая аппаратура отказывалась работать ближе, чем в 10 м от дизельного генератора или искажению результата производила технология изготовления объекта.

Неожиданный результат применения аппаратуры или странные измеренные значения напряжений, кладезь полезной информации для дальнейшей доработки аппаратуры, в случае, же когда результат требуется сейчас, а специалист плохо представляет, как аппаратура работает и что он должен получить это приводит к плачевному результату и результаты измерений оказываются менее точными, чем приблизительный расчет по формулам сопротивления материалов 200 летней давности.

В таких ложных условиях, особенно когда на предприятии отсутствуют более опытные коллеги, у которых можно проконсультироваться (так как метод новый) специалист оказывается один на один со своими проблемами.

Для помощи в решении возникающих проблем мы поддерживаем связь со всеми специалистами, прошедшими в нашем центре подготовку сертификацию (аттестацию), специалисты обращается к нам с возникающими вопросами и делится удачными решениями. Любой специалист может обратиться со своим вопросом в ООО «НУЦ «Качество» и, в большинстве случаев, мы можем либо помочь ему или перенаправить его к тем, кто уже успешно решил подобную проблему. Все примеры нетривиальных задач имеющих важное практическое значение с разрешения организаций, проводивших работы, включается в учебные и подготовительные курсы по НК НДС. Таким образом программа подготовки специалистов постоянно

корректируется с целью приближения курса к реальным полевым условиям применения НК НДС.

В итоге из специалистов НК НДС образовался своего рода клуб по интересам. Для поддержания и развития общения специалистов планируется создание отдельного интернет форума для общения специалистов и в ближайшее время организация семинара по обмену опытом в проведении НК НДС опасных производственных объектов.

ПРИМЕНЕНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ДАТЧИКОВ-ФОЛГ ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ КОМПОЗИТОВ, АРМИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ ВОЛОКНАМИ

Бурков М.В.^{1,2}, Панин С.В.^{1,2}, Любутин П.С.¹,
Алтухов Ю.А.¹, Еремин А.В.²

¹*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН;*

²*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

Использование композиционных материалов (КМ) на основе углеродных волокон, благодаря их высоким механическим свойствам, позволяет создавать конструкции, значительно превосходящие по прочностным характеристикам таковые из металлических сплавов. Однако, в силу сложной структуры (разные свойства матрицы и волокна, большое количество границ раздела волокна и связующего) в процессе эксплуатации в изделиях из КМ может возникать множество типов дефектов (потери адгезии на границе волокно-связующее, растрескивание матрицы, расслоения, разрывы волокон и др.).

Значительный интерес для исследователей, занимающихся проблемами неразрушающего контроля, представляют системы встроенного контроля состояния – Structural Health Monitoring (SHM). Такие системы являются источниками информации о наличии/возникновении повреждений, что позволяет существенно повысить безопасность эксплуатации, а также расширить временные интервалы между точками плановой полномасштабной диагностики. Одним из подходов для встроенного контроля деталей является оценка состояния материала с помощью датчиков деформации интегрального типа (ДДИТ) [1]. Суть методики с использованием ДДИТ заключается в оптическом наблюдении за тонким алюминиевым чувствительным элементом, на поверхности которого за счет циклического нагружения формируется деформационный рельеф. Его количественная характеристика позволяет оценивать наработку материала и его состояние.

Так в работе [2] ДДИТ, изготовленные из гальванической медной фольги, предлагаются для диагностики накопления усталостных повреждений металлоконструкциями и восстановления истории их нагружения. Метод на основе ДДИТ является перспективным и для аэрокосмической от-

расли. Так, например, К. Паже из Европейского авиастроительного концерна «Эйрбас» в [3] обсуждает применение ДДИТ в авиастроении.

Однако в данных работах объектом контроля являются изделия и образцы из металлических сплавов. В настоящей работе была поставлена задача провести исследования, связанные с применением ДДИТ для оценки циклической деформации КМ, а также разработать комплекс информативных признаков для анализа изображений фольг-датчиков.

Для циклических испытаний использовали образцы из КМ системы углеродное волокно/эпоксидная матрица, укладка псевдоизотропная $[45^\circ, -45^\circ, 0^\circ, 90^\circ]_{2S}$. На рисунке 1, а приведен чертеж образца, с двумя надпилами и наклеенной на поверхность алюминиевой фольгой; толщина образца 3,3 мм.

Подготовленные образцы с ДДИТ испытывали на одноосное циклическое растяжение с асимметрией цикла $R = 0,1$ с помощью сервогидравлической испытательной машины UTM Biss-00-201. В качестве видеодатчика использовали цифровой зеркальный фотоаппарат Canon EOS 550D с оптическим трактом микроскопа МБС-9 (размеры изображения $12 \times 8 \text{ мм}^2$ – 5184×3456 пикселей).

Для анализа получаемых серий изображений ДДИТ рассчитывали следующие информативные признаки: среднеквадратичная ошибка MSE , информационная Энтропия H , фрактальная размерность ФР и энергия Фурье-спектра $E_{ФС}$. MSE и H традиционно используют для оценки качества/зашумленности изображений; ФР и $E_{ФС}$ применяют для оценки рельефа. Для разных образцов устанавливали разный уровень верхней нагрузки в цикле, и в результате усталостное разрушение происходило при разных наработках. Получены серии изображений фольг для образцов с наработкой до разрушения: $N = 42 \cdot 10^3$ циклов (образец № 1), $N = 74 \cdot 10^3$ циклов (образец № 2) и $N = 151 \cdot 10^3$ циклов (образец № 3). На рисунке 2 представлены изображения двух расчетных областей – центральной и верхней (из-за наличия КН рельеф на фольге формируется неравномерно), выделенных из исходного полного изображения, для образца № 2 с наработкой $N = 74 \cdot 10^3$ циклов.

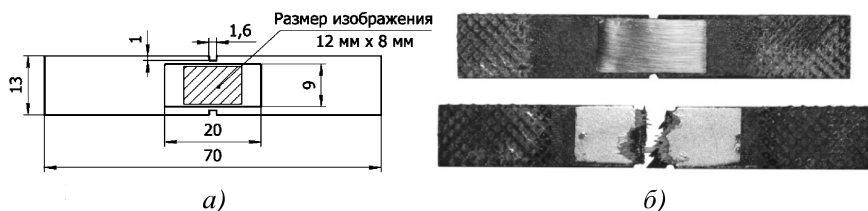


Рис. 1:

а – чертеж образца с наклеенной фольгой;
б – фотографии исходного и разрушенного образцов

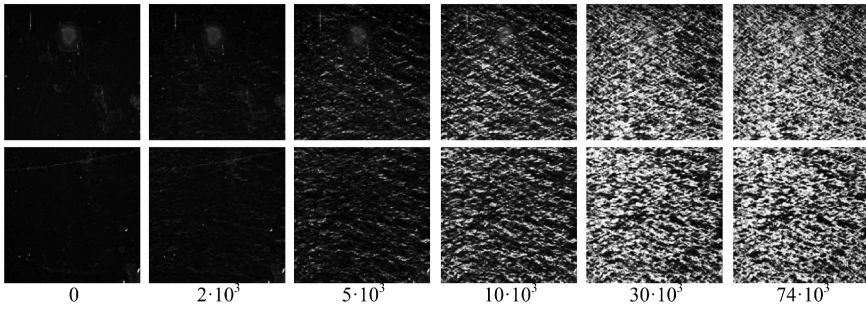


Рис. 2. Фотографии ДДИТ в зависимости от наработки; показаны две области: верхняя и центральная; указана величина наработки N , циклов

На рисунке 3 представлены графики MSE и H для трех образцов с различной наработкой до разрушения. По данным тестирования методики при нагружении образцов с двумя надпилами и исследовании реакции фольги при приложении разных уровней нагрузки, выделены следующие закономерности:

- 1) согласно графикам изменения всех информативных признаков рельеф в центральной области формируется быстрее, чем в верхней (выше скорость роста графиков), а его неоднородность выше (выше абсолютное значение информативного признака);
- 2) графики всех информативных признаков имеют трехстадийный характер, при этом длительности стадий для каждого из них несколько различаются;

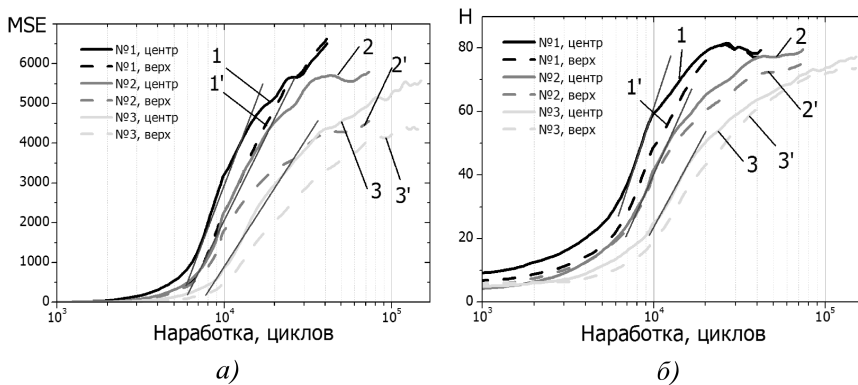


Рис. 3. Графики MSE (а) и энтропии H (б) для трех образцов: номеру со штрихом соответствует верхняя область фольги, без штриха центральной

3) предложенные информативные признаки предоставляют более надежные результаты, чем таковые, описанные в литературе. Так с использованием в качестве ДДИТ алюминиевой фольги можно проследить изменение состояния образца вплоть до 150 тыс. циклов наработки.

Основным направлением данной работы является поиск новых и модернизация применяющихся информативных признаков для обработки серий изображений. Продолжение исследований будет связано с применением данной методики в условиях изменения НДС в испытываемых образцах, например, в случае образцов с одним боковым надпилем, имеющим различную глубину. Кроме того, планируется провести испытания образцов с центральным отверстием (и с наклеенными ДДИТ).

Работа выполнена при поддержке гранта СП-3788.2013.3 – Стипендия президента РФ для аспирантов и молодых ученых.

Литература

1. **Змызгова Т.Р.** Экспериментальная методика регистрации и оценки накопленного усталостного повреждения в материале нефтегазового трубопроводного оборудования с помощью датчиков деформации интегрального типа // Экспозиция. Нефть. Газ. 2012. Т. 25, № 7. С. 14 – 19.

2. **Кузяков О.Н., Сызранцев В.Н., Марголин А.М.** Система сбора и анализа данных с датчиков деформаций интегрального типа // Вестник Тюменского государственного университета. 2010. № 6. С. 139 – 146.

3. **Паже К.** Применение датчиков на основе тонких металлических пленок для контроля целостности конструкций воздушных судов // Физическая мезомеханика. 2007. Т. 10, № 6. С. 43 – 48.

ОБРАЩЕНИЕ МНОГО-СЕНСОРНЫХ ДАННЫХ В ПРОБЛЕМЕ ОЦЕНКИ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА

Венгринович В.Л.¹, Клименко С.В.²

¹*Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь;*

²*Институт физико-технической информатики, г. Протвино, Россия*

В настоящей статье рассматриваются системы непрерывного мониторинга (СМ) состояния технических объектов, выполняющие функции их органов чувств и призванные предупреждать об опасности повреждения или разрушения таких систем. СМ является одним из видов систем обеспечения безопасности (СОБ). Несмотря на расширение функциональных возможностей и номенклатуры современных сенсорных устройств, используемых в системах мониторинга (СМ), проблема обработки много-

сенсорных данных с целью обнаружения повреждения и прогнозирования остаточного ресурса конструкций остается весьма актуальной и активно обсуждается. Ключевыми вопросами остаются: оптимизация сенсоров, оценка рисков, уязвимости и робастности, формирование представлений опасности, реакция на раздражители, снижающая уязвимость. Круг решаемых при этом задач позволяет отнести СМ к интеллектуальным системам, а проблемы их развития к междисциплинарным.

Существует большая разница между воспринимаемым сенсорной системой сигналом и его интерпретацией. В живых системах сигнал воспринимается органами чувств, а анализируется и интерпретируется мозгом животного или человека. Такое разделение функций объясняется различием в биофизическом устройстве органов чувств и мозга соответственно. Говоря математическим языком, если воздействие внешних раздражителей на органы чувств является **прямой** задачей, то задача реконструкции образа опасности и оценка рисков по этим сигналам является **обратной**. В животных такое решение обратной задачи происходит на уровне «ощущения, восприятия и представления» (И.П. Павлов). В основе воссоздания у них образа опасности лежат их когнитивные способности, без которых полноценная система обеспечения безопасности невозможна. В технических системах, где сигналы сенсоров оцениваются количественно, воссоздание образа опасности должно производиться путем решения обратной задачи с использованием в качестве априорной информации также предыдущего опыта. С точки зрения теоремы Целльнера об оптимальной обработке информации, воссоздаваемые образы могут быть оптимальным образом получены из соответствующих входных данных с помощью решения обратной задачи, в том числе, в Байесовской постановке.

Конечными целями СМ являются поиск повреждений и дефектов в конструкции и оценка рисков прямых и, в особенности, косвенных последствий, понимая под последними последовательное повреждение, например, обрушение. Один из аналитических способов достижения этих целей рассматривается в настоящей работе. Базовая система объекта (БСО) представляется в виде марковской последовательности состояний, переход между которыми под воздействием различных факторов происходит с определенной вероятностью, которая оценивается предварительно при моделировании поведения объекта. Связь СМ с БСО и этапы моделирования и оценки рисков показаны на рис. 1. В БСО могут возникать опасные состояния – $A_r = \{A_k^r\}$, где r – индекс состояния системы, k – номер элемента системы, а СМ фиксирует мгновенное множество результатов измерения – $B_r = \{B_i^r\}$, где r – индекс состояния системы датчиков, i – его номер. Задача состоит в том, чтобы минимизировать условную вероятность:

$$\min : -\log P_r^{A_r}(A_r | B_r) = -\log P_r(B_r | A_r) - \alpha \log P_r(A_r) : \{A_r \in R^n\}, \quad (1)$$

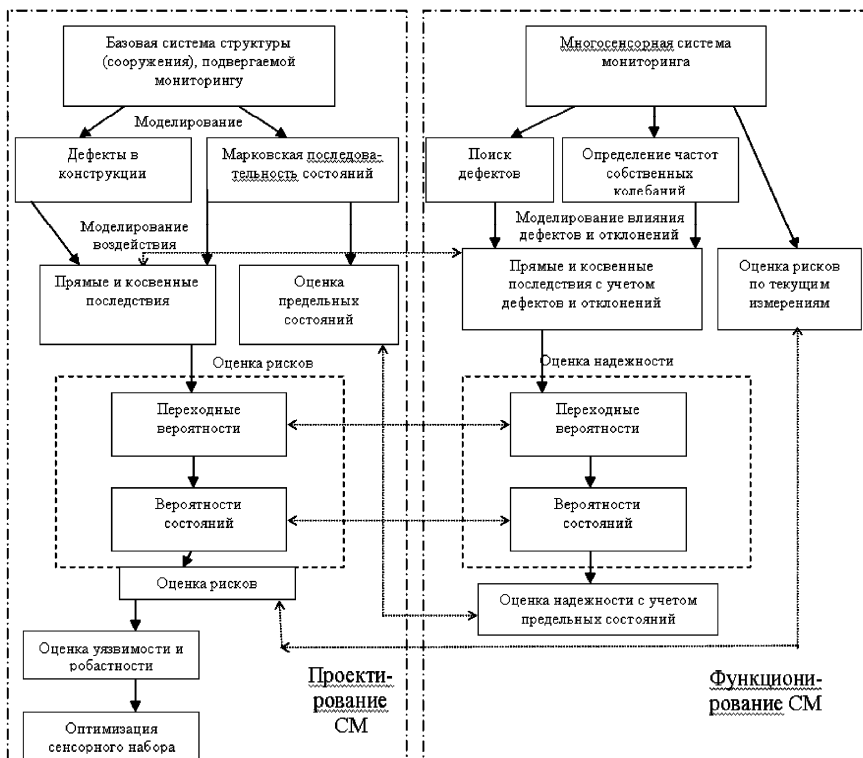


Рис. 1. Взаимосвязь системы мониторинга с базовой системой объекта. Этапы моделирования при проектировании и функционировании системы мониторинга

где $P_r(B_r | A_r)$ – условная вероятность получения набора сенсорных данных при заданном опасном состоянии элементов конструкции; $P_r(A_r)$ – априорная вероятность рисков повреждения элементов конструкции; α – коэффициент регуляризации.

Сущность формулы (1) состоит в том, что для того, чтобы повысить эффективность прогноза вероятности $P_r(k)$ перехода конструкции в опасное состояние по данным результатов измерения

$$P_r(k) = \sum_{l=1}^L P_r(k-1) \| P_{r,l} \|,$$

необходимо максимизировать достоверность измеренных данных с некоторой штрафной функцией, накладываемой на поведение переходной вероятности системы в опасное состояние, например, гладкости, позитивности и др. Целью моделирования системы мониторинга является вычисление функ-

ции распределения переходных вероятностей при наличии заданного набора показаний сенсоров и заданной априорной вероятности нарушения целостности. Три задачи: моделирование поведения БСО, моделирование реакции СМ и количественная оценка рисков относятся к наиболее трудно реализуемым из-за большого числа возможных сценариев поведения БСО и СМ.

Для оценки предельных состояний и оценки рисков по текущим измерениям в настоящей работе предлагается использовать предшествующий данному моменту измерения находящийся в памяти сценарий функционирования БСО и СМ во взаимосвязи со сценарием основного воздействия на объект (ВнО), например, скорости и направления ветровой нагрузки на здание. Эта непрерывно пополняемая база данных позволяет установить корреляции поведения БСО, СМ и ВнО, и использовать их для ситуационного моделирования дальнейшего поведения БСО по данным текущих измерений. В конечном счете она позволяет реализовать алгоритм построения самообучающейся системы. Наличие аналитически используемой предыстории поведения конструкции принципиально отличает СОБ на основе СМ от СОБ других видов.

Модель поведения БСО описывается ее графом состояния. Численное моделирование переходных вероятностей определяет отображение $y = f(x) : R^n \rightarrow R^m$ из n -мерного пространства элементов БСО в m -мерное пространство результатов измерения, причем $n \ll m$. В много-модальной СМ рассматривается метамодель с радиальными базисными функциями в виде представления $f(x) = \sum_i c_i \Psi(|x - x_i|)$, где Ψ – специальная функция,

зависящая только от евклидоваго расстояния между точками x и x_i – соответствующими векторами результатов измерения. В процессе накопления данных применяется понижение размерности методами компонентного анализа (РСА). Обработывая последовательности текущих векторов результатов измерений за достаточно продолжительное время и анализируя реакцию БСО (моделированием) и СМ (измерением), можно рекурсивно предсказывать поведение БСО по положению евклидоваго положения текущей точки.

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА И РИСКА НА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСПРЕСС-МЕТОДОВ НК

Дубов А.А.

ООО «Энергодиагностика», Москва, Россия

Известно, что основная цель 100 % обследования – выявить потенциально опасные зоны концентрации напряжений (ЗКН), в которых происходит развитие повреждений из-за коррозии, усталости и ползучести.

ЗКН – это не только заранее известные области, где особенности конструкции создают различные условия для распределения напряжений, создаваемых внешней рабочей нагрузкой, но и случайно расположенные области, где в силу начальной неоднородности структуры металла в сочетании с нерасчетными дополнительными рабочими нагрузками возникли большие деформации.

В 2008 г. опубликован ГОСТ Р 53006–2008 «Оценка ресурса потенциально опасных объектов на основе экспресс-методов. Общие требования». Данный стандарт разработан специалистами ООО «Энергодиагностика» и ТК-132 Росстандарта.

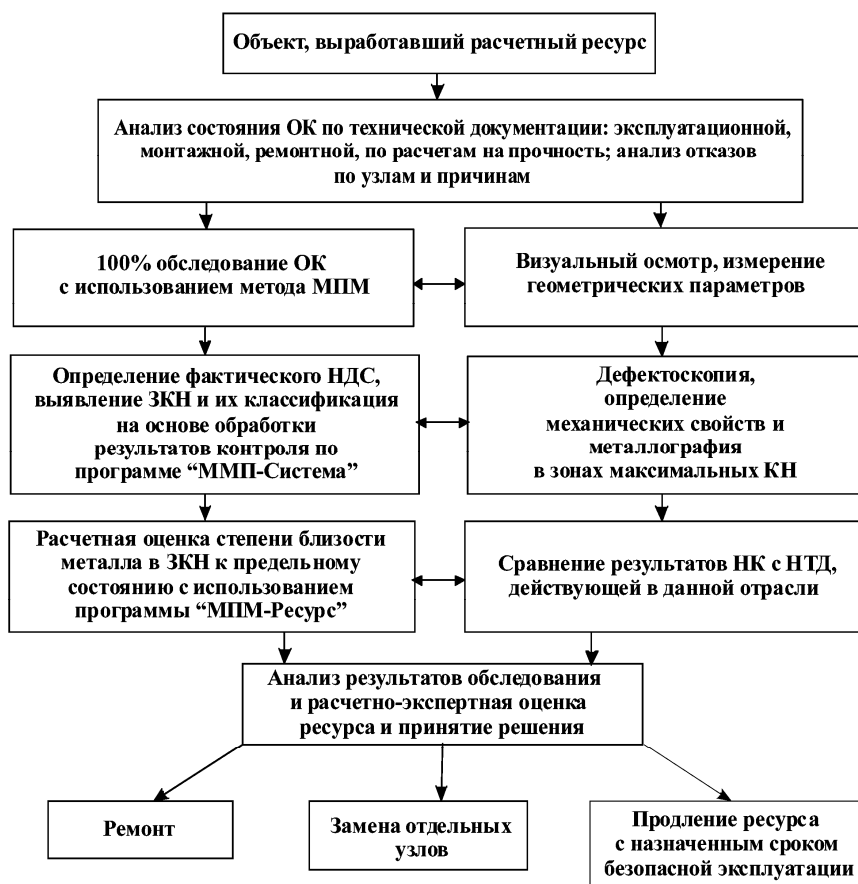


Рис. 1. Структурная схема определения остаточного ресурса оборудования с использованием метода МПМ

К экспресс-методам отнесены пассивные методы НК, использующие внутреннюю энергию металла конструкций:

- метод акустической эмиссии (АЭ);
- метод магнитной памяти металла (МПМ);
- тепловой контроль.

Эти методы получили в настоящее время наибольшее распространение на практике для ранней диагностики повреждений оборудования и конструкций.

На рисунке 1 представлена структурная схема определения остаточного ресурса оборудования с использованием метода МПМ. Принципиальным отличием такого подхода к оценке ресурса является выполнение 100 % обследования объекта контроля (ОК) с выявлением всех потенциально опасных ЗКН – источников возникновения повреждений при дальнейшей эксплуатации оборудования.

При реализации предлагаемого ГОСТ Р 53006–2008 предоставляется возможность в большинстве случаев без выполнения сложных поверочных расчетов на прочность делать экспертную оценку ресурса на основе комплексного обследования оборудования и назначать срок безопасной эксплуатации.

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ И МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ПО ВЕЛИЧИНЕ ПОЛЯ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ МЕТАЛЛА

Загидулин Р.В., Загидулин Т.Р.
ООО «НТЦ «Спектр», г. Уфа, Россия

Магнитный метод контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) стальных изделий и металлоконструкций основан на тесной корреляционной зависимости между структурно-чувствительными магнитными параметрами металла и величиной механического напряжения [1, 2].

В работах [3] исследована зависимость остаточной намагниченности металла от величины механического напряжения и показана возможность оценки НДС металла стальных изделий по напряженности поля остаточной намагниченности. На примере практического использования индикатора механического напряжения металла ИН-01 показано, что контроль НДС металла по величине поля остаточной намагниченности обладает большей магнитоупругой чувствительностью и локальностью по сравнению с существующими магнитными структуроскопами [4].

В зависимости от соотношения магнитного и механического состояний металла стального изделия, связь остаточной намагниченности металла

и величины механического напряжения может иметь качественно различный характер. Для практики НК и ТД характерны два случая:

- остаточная намагниченность металла *деформируемого стального изделия*, когда начальное магнитное состояние металла формируется без влияния внешнего механического напряжения;
- остаточная намагниченность металла *деформированного стального изделия*, когда его магнитное состояние формируется в присутствии НДС металла стального изделия, установившегося в результате длительного воздействия на металл внешних механических напряжений.

Зависимость напряженности поля остаточной намагниченности металла от механического напряжения лежит в основе работы индикаторов механического напряжения металла ИН-01м, ИН-02, которые предназначены для магнитного контроля НДС металла стальных изделий и элементов металлоконструкций.

Индикатор механического напряжения металла ИН-01м имеет статический режим измерения и предназначен для контроля НДС локального участка металла, в основном, сложно-профильных стальных изделий и элементов металлоконструкций. Он имеет наибольшую локальность контроля металла (в зависимости от размера полюса намагничивающего устройства, диаметр контролируемой области металла составляет 10...20 мм). Индикатор механического напряжения металла ИН-02 имеет динамический режим измерения и предназначен для непрерывного (сплошного) контроля НДС металла путем сканирования поверхности элемента металлоконструкции.

Оценка НДС металла осуществляется по результатам магнитного контроля в совокупности последовательно расположенных точек на поверхности контроля, при этом определяются границы области с повышенным НДС металла, и устанавливается степень деформации металла (упругая, упруго-пластическая, или пластическая).

Остаточный ресурс элементов металлоконструкции по результатам магнитного контроля определяется на основе предварительно установленной экспериментальной зависимости величины магнитного параметра от количества циклов нагружения (кривая усталости металла) [5].

Вид функциональной зависимости для кривой усталости металла определяется режимом нагружения, который согласно стандарту ИСО 4301 разбит на 4 группы. В работе предложены оптимальные функциональные интерполяции кривой усталости металла для различных режимов нагружения, выраженные через суммы конечного ряда однотипных функций. Описывается методика определения коэффициентов ряда, которая обеспечивает минимальное значение дисперсии для интерполирующей кривой.

В качестве примера практического применения приводятся результаты магнитного контроля НДС основных элементов металлоконструкции буровой вышки типа БУ-75, наработка которой составляла 21 год, с комплекс-

ным использованием индикаторов механического напряжения металла, которые применялись в следующем порядке:

- индикатором механического напряжения металла ИН-02 осуществляется сплошное сканирование поверхности элементов металлоконструкции буровой вышки с целью выявления областей с повышенным НДС металла;

- индикатором механического напряжения металла ИН-01м и магнитным структуроскопом типа КРМ-Ц-К2М осуществляется оценка величины механического напряжения в выявленных областях с повышенным НДС металла.

В результате магнитного контроля элементов металлоконструкции буровой вышки были выявлены области с повышенным НДС металла, в которых показания индикаторов механического напряжения металла ИН-01м, ИН-02 были на 40...45 % больше, чем в остальных участках металла.

На основе количественной оценки величины механического напряжения металла (по показаниям индикатора механического напряжения металла ИН-01м) было установлено, что НДС металла в указанных участках элементов металлоконструкции буровой вышки соответствует области упруго-пластической и пластической деформации.

Для оценки остаточного ресурса металлоконструкции была использована полуэмпирическая зависимость величины фактических остаточных механических напряжений металла от времени эксплуатации буровой вышки, согласно методике оценки остаточного ресурса металлоконструкции грузоподъемных машин по результатам магнитного контроля [5].

Показана возможность приблизительной оценки остаточного ресурса и работоспособности буровой вышки по результатам магнитного контроля буровой вышки даже при отсутствии полных сведений о фактических условиях эксплуатации и величинах диагностических магнитных параметров. Для этого использована априорная информация о состоянии металла буровой вышки перед началом эксплуатации и в момент проведения магнитного контроля, на основе чего был установлен интервал времени гарантированной безопасной эксплуатации металлоконструкции.

В качестве второго практического примера приводятся результаты магнитного контроля элемента буровой колонны – стального переводника, испытывающего при эксплуатации высокие динамические нагрузки. Большинство стальных переводников из данной партии разрушились в процессе эксплуатации раньше установленного производителем срока.

С помощью индикатора механического напряжения металла ИН-01м были получены картограммы напряженности поля остаточной намагниченности стального переводника, которые указывают на местоположение областей с повышенным НДС металла и значительного градиента механического напряжения металла.

В результате спектрального анализа проб в выявленных областях с повышенным НДС были установлены значительные отклонения в элементном составе металла стального переводника от требований, предъявляемых ГОСТ 4543–71.

На основе оптико-микроскопических исследований показано, что в областях со средним уровнем НДС металл имеет равномерную мелкозернистую микроструктуру, в то время как в области с повышенным значением НДС содержатся крупные нерегулярные включения графита. Величина микротвердости, измеренная в области металла со средним значением НДС, составляет 450 НВ, при этом значение микротвердости в области металла с повышенным значением НДС не превышает 122 НВ. Низкая прочность металла, установленная при исследовании микроструктуры, полностью согласуется с результатами магнитного контроля.

Магнитный контроль с помощью индикатора механического напряжения металла ИН-01м рекомендован к применению в практике технической экспертизы элементов металлоконструкций экспертными лабораториями МЮ РФ [6].

Литература

1. **Неразрушающий** контроль: Справочник: В 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: Магнитные методы контроля / В.В. Клюев, В.Ф. Мужицкий и др. М.: Машиностроение, 2004. 832 с.
2. **Исследования** по физике металлов и неразрушающим методам контроля / под ред. Н.С. Акулова. Минск: Наука и техника, 1968. 355 с.
3. **Загидулин Р.В., Загидулин Т.Р.** Исследование зависимости поля остаточной намагниченности от напряженно-деформированного состояния металла стального изделия. 1. Зависимость остаточной намагниченности металла от механического напряжения // Контроль. Диагностика. 2011. № 7(157). С. 12 – 16.
4. **Загидулин Р.В., Загидулин Т.Р., Абдрахманов Р.Г.** Контроль усилия затяжки стальных болтов и шпилек с помощью индикатора механического напряжения металла ИН-01 // Контроль. Диагностика. 2012. № 4(166). С. 15 – 23.
5. **МУ РД ИКЦ «Кран» 007–97.** Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса подъемных сооружений при проведении их обследования и техническом диагностировании. Согласовано Госгортехнадзором России 27.11.97 № 12-7/1113.
6. **Методика** исследования напряженно-деформированного состояния изделий из ферромагнитных материалов. ФБУ РФЦСЭ при МЮ РФ, ФБУ БашЛСЭ МЮ РФ, БашГУ, 2012.

НЕИЗБЕЖНОСТЬ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПРИ ОЦЕНКЕ РИСКА АВАРИИ

Иванов В.И.¹, Корнилова А.В.², Мусатов В.В., Сергиев Б.П.³

¹ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность»;

²ЗАО «Прочность»;

³ЗАО «ГИАП-ДИСТцентр»

В законе Российской Федерации от 4 марта 2013 г. № 22-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» особое внимание уделяется использованию понятия «риск аварии» для количественной характеристики промышленной безопасности: термин «риск» встречается 5 раз. Тем самым понятие «риск аварии» активно внедряется в практику оценки промышленной безопасности.

Упомянутым законом вводится принципиально новое требование: «Обоснование безопасности опасного производственного объекта», которое оформляется в виде специального документа. Этот документ должен содержать сведения о результатах оценки риска аварии на опасном производственном объекте (ОПО) и связанные с ней угрозы, а также условия безопасной эксплуатации ОПО, включая требования к эксплуатации технических устройств. Для реализации этих положений выпущен приказ Ростехнадзора (15.07.2013 г. № 306) «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Общие требования к обоснованию безопасности опасного производственного объекта».

Требование оценки риска содержится также в документе «Декларация промышленной безопасности», который составляется с использованием методических документов Ростехнадзора РД 03-418-01 («Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов») и РД 03-357-00 («Методические рекомендации по составлению декларации промышленной безопасности опасного производственного объекта»).

Анализ риска аварий технических устройств на опасных производственных объектах (ОПО) проводится в настоящее время с использованием данных о статистике аварий путем описания развития процесса аварий и последующего подсчета потерь.

Данный подход весьма полезен, поскольку позволяет повысить культуру промышленной безопасности, однако имеет существенное принципиальное ограничение, связанное с использованием данных об уже происшедших авариях, их статистике, которую для большинства технических устройств на ОПО либо трудно, либо невозможно установить в принципе. Это связано с тем, что каждое сложное техническое устройство на ОПО обладает собственными уникальными свойствами, своим набором дефектов. Кроме того, статистика аварий содержит информацию о совершив-

шихся событиях за некоторый отрезок прошедшего времени. Тогда как большее значение имеет информация о текущем техническом состоянии объекта. Оценку риска аварии в полном объеме можно было бы выполнить с использованием информации о техническом состоянии объекта, получаемой с использованием комплекса методов Неразрушающего Контроля и Технического Диагностирования (НК → ТД).

Развитие методов Неразрушающего Контроля и Технического Диагностирования (НК → ТД) достигло такого уровня, который может позволить в настоящее время решать задачи оценки вероятности аварии технических устройств с использованием результатов выполненных работ по НК → ТД.

В докладе проводится анализ возможности и готовности НК → ТД представлять информацию, позволяющую выполнить оценку вероятности аварии, формулируются требования к НК → ТД и намечаются пути развития данных подходов. В частности рассматриваются вопросы введения новых требований к НК → ТД, определяемых необходимостью представления количественных показателей НК, связанных с достоверностью выполняемых оценок полученных данных о размерах дефектов и погрешностях измерений, использования методов вероятностной механики разрушения, что необходимо для оценки реальных значений вероятности аварии.

АНАЛИЗ ЭМПИРИЧЕСКИХ ДАННЫХ В ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

Карпов В.М.

НИИИИИ, Москва, Россия

Обработка результатов наблюдений и представление их в виде компьютерных математических моделей – это веление времени для любых областей науки, включая диагностику автоматических систем. Виртуальное компьютерное моделирование открывает перспективу на решение таких задач, которые на уровне физических моделей принципиально были неразрешимы [4 – 7].

Широкий спектр задач регрессионного анализа можно отнести к поиску такого вида решений, и они могут найти применение в области диагностики технических устройств и систем управления объектами большой сложности.

Использование нелинейной регрессии и особенно оценка ее точности должна лежать в основе компьютерного моделирования диагностических систем, поскольку именно в этой области используются большие объемы экспериментальных данных, и требуется высокая точность вычислений.

Уравнение простой регрессии характеризует связь между двумя переменными, которая проявляется как некоторая закономерность лишь в среднем по совокупности наблюдений.

В уравнении регрессии корреляционная по сути связь признаков представляется в виде функциональной связи, выраженной соответствующей математической функцией

ФВ рассматриваемой статистической модели функция φ , с помощью которой описывается зависимость отклика Y от регрессионной переменной X (от объясняющих факторов), в общем случае нелинейна, т.е. отклик Y представляется нелинейной функцией дискретного аргумента $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ и вектора неизвестных линейных параметров θ в виде уравнения:

$$Y = \varphi(\theta, X) + \varepsilon, \quad (1)$$

где ε – вектор случайных ошибок, для которых равенство нулю математического ожидания – главное допущение [1, 8].

В диагностике обнаружение проблемных состояний объекта распознается по характерным результатам появления сильных влияющих воздействий (ВВ). На фоне гауссовского распределения плотности вероятности отклонений сигналов, обусловленных предельно малыми по величине и неограниченными по количеству ВВ, в полученных эмпирическим путем данных диагностического эксперимента возникают малые подмножества доминирующих по величине ВВ.

В этой ситуации доминирующие ВВ не только не могут быть отнесены к категории «промахов» и отброшены, но должны рассматриваться как наиболее информативные данные.

При этом в диагностике оценки результатов измерений следует представлять не в терминах вероятностных характеристик (например, плотность вероятности распределения и др.), а в виде детерминированных отклонений в метриках S или L_p .

Современные компьютеризированные системы обработки данных в технологии диагностирования первую и основополагающую задачу должны решать на уровне восстановления регрессионной функции и оценки степени близости регрессора к истинной форме искомой действительной функции.

Переход от вероятностных критериев оценки близости регрессора к детерминированным оценкам точности восстановления регрессионной функции позволил выявить главное: некорректность общепринятого выражения уравнения регрессии [1, 2, 3, 8].

Виртуальный эксперимент позволил количественно анализировать структуру и величины составляющих погрешностей регрессионной функции и обнаружить принципиальную неадекватность используемого при анализе эмпирических данных уравнения регрессии, выразившуюся в том, что систематическая составляющая погрешности регрессора имеет место даже при нулевой систематической погрешности в результатах экспериментальных данных.

С помощью виртуального компьютерного эксперимента удалось показать, что уравнение регрессии должно корректироваться ведением поправки Δ до вида:

$$Y = \varphi(\theta, X) + \varepsilon + \Delta, \quad (3)$$

где Δ – вектор систематических ошибок, для которых источником является некорректный выбор аппроксимирующей функции и погрешности вычислений обобщенной нелинейной регрессии.

В качестве случайной составляющей ε используются значения невязок. По невязке традиционно вычисляется и минимизируется функционал при отыскании регрессионной функции методом наименьших квадратов

В регрессионных компьютерных моделях, осуществляющих преобразование дискретных входных эмпирических данных, отягощенных случайными погрешностями, в аналитические зависимости, предельно важно на выходе иметь метрологические оценки как непосредственно самих регрессоров, так и их производных.

Проблема в современной методологии восстановления регрессионной функции на основе эмпирических данных состоит в том, что решение ограничивается получением вероятностных оценок и не дается ответ о степени близости функций, т.е. не определяется ни погрешность регрессора, ни погрешность его производных [1 – 3, 8].

Исходя из технических и экономических проблем эмпирического получения высокоточных данных, только виртуальный эксперимент обеспечивает возможность доказательства того, что даже пренебрежимо малая случайная составляющая погрешности регрессора не исключает наличия сколь угодно большой систематической ошибки восстановленной регрессии и особенно ее производных.

Литература

1. **Айвазян С.А. и др.** Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. М.: Финансы и статистика, 1983. 471 с.
2. **Елисеева И.И. и др.** Эконометрика М.: Финансы и статистика, 2008. 576 с.
3. **Справочник** по теории вероятности и математической статистике / В.С. Корольок и др. М.: Наука, 1985. 640 с.
4. **Карпов В.М.** Задача восстановления функции преобразования при метрологическом моделировании. Труды 6-й науч.-техн. конф // Состояние и проблемы технических измерений: сб. тр. МГТУ им. Н.Э. Баумана. М., 1999.
5. **Карпов В.М.** Обратная задача метода наименьших квадратов при метрологическом моделировании. Труды 7-й науч.-техн. конф. // Состояние

и проблемы технических измерений: сб. тр. МГТУ им. Н.Э. Баумана. М., 2000.

6. **Карпов В.М.** Метрологическое моделирование информационно-измерительных каналов контроля неэлектрических параметров // Проектирование и технология электронных средств. 2002. № 1.

7. **Карпов В.М.** Функции преобразования в метрологическом моделировании // Программные продукты и системы. 2009. № 2.

8. **Britanica.** Энциклопедия, 2007.

КОНЦЕПЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ КАК СРЕДСТВА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА

Кузнецов К.А.

ОАО «ИркутскНИИХиммаш», г. Иркутск, Россия

За многолетнюю практику ОАО ИркутскНИИХиммашпо диагностированию технических устройств (ТУ), эксплуатируемых на опасных производственных объектах для оценки их фактического состояния и определения остаточного ресурса сформирован огромный массив данных [1].

Для последующей интерпретации этого массива данных и получения необходимой специалисту (эксперту) информации требуется его адекватная обработка.

В силу динамичного развития информационных технологий и с целью повышения эффективности экспертизы промышленной безопасности (ЭПБ) в настоящее время приобретает актуальность автоматизация этого процесса [2].

ЭПБ состоит из двух основных этапов: технического диагностирования ТУ и разработки заключения ЭПБ. Для проведения технического диагностирования (ТД) подготавливаются данные результатов анализа технологического регламента, проектной, монтажной, эксплуатационной, ремонтной и иной документации, характеризующих объект, подвергаемый техническому диагностированию. На основании этих данных, оформленных в виде Карты исходных данных (КИД), разрабатывается Программа ТД, в которой эксперт определяет методы и объемы контроля технического состояния ТУ.

Результаты ТД оформляются Протоколами по каждому виду контроля и являются объективными свидетельствами для обоснования фактического технического состояния, проверки прочности ТУ и установления его остаточного ресурса. Все полученные данные отображаются в заключении ЭПБ ТУ.

На вышеперечисленных этапах получают данные, которые вносятся в соответствующую базу данных ЭПБ, разработанной в институте. Они образуют необходимую информацию, которая при оценке технического состояния и остаточного ресурса способствует накоплению специализированных знаний и соответствующего опыта.

Эффективное и качественное проведение ЭПБ основывается как раз на знаниях высококвалифицированных специалистов и накапливаемым ими годами опыте. Это обуславливает необходимость применения методов поддержки принятия решений, базирующихся на информационных технологиях и искусственном интеллекте, позволяющих накапливать подобные знания и обрабатывать для решения тех или иных задач.

Предлагаемый способ повышения эффективности оценки технического состояния и остаточного ресурса представлен Информационной Технологией и Интеллектуальной Программной Системой ЭПБ (ИПС ЭПБ), основывающихся на методе экспертных систем, моделях кластеризации и классификации, базах данных и знаний. Принципиальная архитектура ИПС ЭПБ представлена на рис. 1.

ИПС ЭПБ обеспечивает автоматизированный сбор, хранение и обработку информации при подготовке, проведении и составлении соответствующих документов, что сокращает затраты времени на выполнение работ

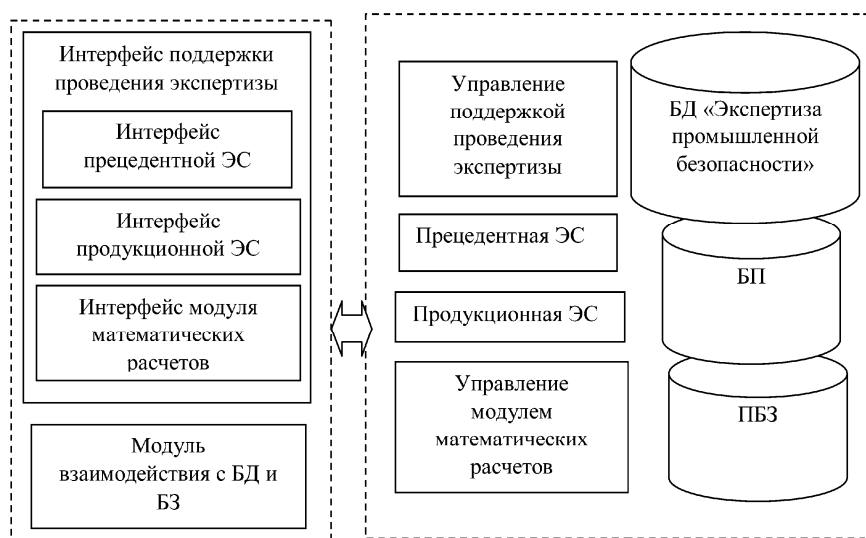


Рис. 1. Принципиальная архитектура ИПС ЭПБ:

БД – база данных; БП – база прецедентов; ПБЗ – производственная база знаний;
ЭС – экспертная система

по экспертизе, повышает качество оценки технического состояния ТУ, расчета остаточного ресурса и заключений ЭПБ. ИПС ЭПБ выполняет автоматизированное извлечение знаний о закономерностях изменения технического состояния ТУ различного назначения из информации об их техническом состоянии на основе ее классификации соответствующей моделям кластеризации.

Разработанные методы, модели и средства обоснования содержания и объемов работ по оценке технического состояния и остаточного ресурса, по определению причин его изменения, составляют используемую институтом методологию исследования и обеспечения промышленной безопасности. Методология положена в основу автоматизированной технологии организации и проведения ЭПБ.

Использование методов, моделей и средств для реализации информационных технологий и методов искусственного интеллекта, обеспечивают структурирование данных и знаний, получение, хранение и обработку диагностической и аналитической информации необходимой для эффективной организации и проведения ЭПБ.

Классификация информации о техническом состоянии ТУ, выполненная в соответствии с разработанными кластерами, обеспечивает выявление закономерности появления дефектов, повреждений, инцидентов и аварий для ТУ различного типа, вида и конструктивного исполнения.

Применение метода экспертных систем позволяет использовать накопленные данные и знания о результатах диагностирования, а также опыт экспертов. Информационные технологии и ИПС позволяют сопровождать ЭПБ, хранить и обрабатывать соответствующие данные и знания, обеспечивающих поддержку принятия решений при планировании состава и объемов диагностических работ, проводить вычислительный процесс при оценке технического состояния, остаточного ресурса и риска аварий и инцидентов, осуществлять автоматизированное формирование заключений ЭПБ [3].

Литература

1. **Практическая** диагностика: В 3 т. / под ред. А.М. Кузнецова. Иркутск: ОАО «ИркутскНИИХиммаш», 2009. 1199 с.
2. **Берман А.Ф., Николайчук О.А., Юрин А.Ю.** Автоматизация прогнозирования технического состояния и остаточного ресурса деталей уникальных машин и аппаратуры // Заводская лаборатория. 2009. № 3. С. 48 – 57.
3. **Пути** повышения эффективности оценки технического состояния и остаточного ресурса оборудования специализации ОАО «ИркутскНИИХиммаш». Препринт НИИХиммаша. 2013. 15 с.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА АВИАТЕХНИКИ ПРИ ЛЕТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЯХ

Лозовский В.Н.
РОНКТД

При каждом летном происшествии, вызванном отказом авиатехники, осуществляется тщательное исследование причины износа и разрушения конкретных деталей, вызвавших отказ. Без этого невозможны эффективные мероприятия по предупреждению повторения аналогичных происшествий в будущем. В связи с этим осуществляется техническая диагностика (ТД) разрушившейся детали с использованием металлофизических методов анализа состояния ее излома и материала, а далее средствами неразрушающего контроля (НК) оценить состояние аналогичных деталей на эксплуатируемой авиатехнике и изучить материалы по расследованиям, ранее имевшимся летным происшествиям такой же авиатехники. ТД позволяет установить произошел отказ из-за дефекта в детали и связан ли он с производством, несовершенством конструкции или нарушениями условий эксплуатации авиатехники.

Рекомендации направлены на предотвращение повторений подобных происшествий в будущем. В частности, разрабатываются предложения по рациональному использованию методов и средств НК деталей с применением специальных приспособлений для доставки датчиков к трудно доступным в летательном аппарате или авиадвигателе контролируемым деталям. Для иллюстрации эффективности проводившихся ТД и типичных ошибок, допускаемых при расследованиях причин летных происшествий рассмотрим некоторые конкретные примеры, связанные с известными случаями из практики Гражданской авиации.

Из рассмотренных примеров следует, что для достоверного заключения о причине разрушения деталей необходимо проведение анализа как результатов НК деталей аналогичных разрушившимся на авиатехнике, находящейся в эксплуатации, так и материалов, относящихся к расследованиям причин ранее имевшихся случаев летных происшествий тех же типов летательных аппаратов. Такой анализ обязателен если в указанных расследованиях рассматривались версии, связанные с разрушением деталей аналогичных исследуемым. Иначе даже Межгосударственный авиационный комитет (МАК) в сделанных заключениях о причинах летных происшествий не избежал ошибок.

Длительный опыт по участию в сотнях расследований летных происшествий, связанных с отказами авиатехники, свидетельствует о том, что ТД износившихся и разрушенных деталей представляет проведение своеобразной научно-исследовательской работы, требующей привлечения высококвалифицированных специалистов ряда областей науки, включая НК.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА КРИТИЧЕСКИ И СТРАТЕГИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ В ШТАТНЫХ И НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЯХ

Махутов Н.А., Гаденин М.М.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

Современное развитие фундаментальной теории безопасности обосновывает необходимость изменения традиционных подходов к обеспечению безопасной эксплуатации опасных объектов на новые, перспективные. В их основу должны быть положены нормируемые параметры рисков и безопасности, обосновываемые по критериям надежности, прочности, ресурса и живучести. Ключевым фактором в решении данной проблемы является использование концепции диагностики состояния объектов техносферы и мониторинга рисков возникновения нештатных ситуаций.

С учетом потенциальных опасностей и технологической сложности современных машин и механизмов использование систем диагностики и мониторинга осуществляется для следующих стадий и состояний:

- штатные состояния объектов и нормальные ситуации при эксплуатации;
- опасные аварийные состояния объектов и аварийные ситуации при эксплуатации;
- предельно опасные катастрофические состояния и катастрофические чрезвычайные ситуации.

По мере перехода от штатных (нормальных) состояний к аварийным и катастрофическим характеризуются тремя основными категориями, имеющими соответствующие тенденции (рис. 1):

- рисками, характеризующими рассматриваемые процессы, которые экспоненциально нарастают;
- уровнем и возможностями диагностики состояний, которые существенно сокращаются;
- уровнем мониторинга состояний и рисков, который для катастрофических ситуаций невысок.

Решенные и решаемые в рассматриваемом направлении проблемы характеризуются исторически сложившейся последовательностью формирования фундаментальных научных основ, разработки инженерных методов расчетов и испытаний, создания норм и правил проектирования и изготовления объектов техносферы, обеспечения их функционирования в заданных пределах проектных режимов и параметров. Базовыми поэтапно повышающимися требованиями к штатному (нормальному) функционированию и проектным параметрам функционирования для уникальных и экстремально нагруженных критически (КВО) и стратегически (СВО) важных

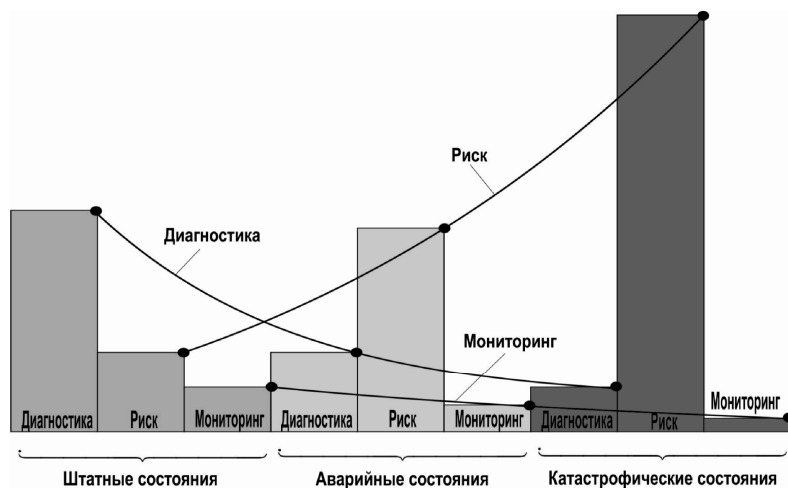


Рис. 1. Структура диагностики и мониторинга состояния инженерных объектов и рисков аварийных и катастрофических ситуаций

объектов на всех стадиях их жизненного цикла стали «прочность → жесткость → устойчивость → ресурс → надежность → живучесть → безопасность → риск → защищенность».

При использовании действующих и разработках новых диагностических систем применительно к каждому классу катастроф и каждому типу аварийных ситуаций должны быть выделены следующие разновидности диагностируемых параметров и характеристик:

- характеристики состояния наиболее важных систем потенциально опасных компонентов оборудования в штатных и аварийных ситуациях;
- характеристики повреждающих факторов при возникновении и развитии аварийных ситуаций;
- характеристики состояния конструкционных материалов и их свойств.

К наиболее важным характеристикам и параметрам состояния машин и конструкций относятся имеющие место в их наиболее нагруженных элементах напряжения σ (деформации e), температуры t , размеры, формы и места возникновения дефектов (трещин) l , которые изменяются при эксплуатации во времени τ . Эти параметры являются зависящими от реальных условий нагружения (давления p , механических, тепловых и электромагнитных усилий, скоростей, ускорений), геометрических форм и размеров конструктивных элементов, свойств конструкционных материалов.

При создании систем обеспечения безопасности машин и механизмов на основе развития и комплексного использования систем диагностики и

мониторинга их эксплуатационных параметров должны учитываться как степень опасности объектов, типы катастроф и аварийных ситуаций (нормальные условия эксплуатации, отклонения от нормальных условий эксплуатации, проектные аварии, запроектные аварии, гипотетические аварии), так и комплексный набор поражающих факторов и комплексная система критериев безопасности. В качестве реализации такого подхода к решению поставленной задачи должны быть предусмотрены следующие мероприятия:

- разработка методологии анализа и обоснования безопасности по критериям рисков;
- разработка единой системы критериев и параметров риска, живучести, устойчивости и безопасности объектов при возникновении аварий и катастроф;
- создание систем физических и математических моделей образования и развития аварий и катастроф;
- определение и классификация основных параметров поражающих факторов и их воздействий на человека, окружающую среду и сложные технические системы;
- построение и назначение критериев, определяющих безопасность людей, окружающей среды и объектов;
- разработка предложений по структуре унифицированных и специализированных методов диагностики, мониторинга и нормативно-технических документов, регламентирующих риск и безопасность эксплуатации объектов техносферы при техногенных и природных катастрофах.

С учетом анализа общих проблем техногенной безопасности и мониторинга рисков $R(t)$, направлений и перспектив развития техносферы обеспечение должного уровня прочности и эксплуатационной безопасности машин и конструкций становится одним из актуальных направлений развития по мере роста рабочих параметров и повышения потенциальной опасности систем «человек–машина–среда». При этом основными задачами дальнейших разработок в этом направлении являются:

- фундаментальные исследования по механике деформирования и по механике катастроф, лежащих в основе создания критериев и методов решения проблем прочности, ресурса, живучести и безопасности объектов с повышенной потенциальной опасностью техногенных аварийных ситуаций;
- прикладные исследования и разработки инженерных методик, алгоритмов, программ, моделей, стендов, аппаратуры для расчетно-экспериментального обоснования конструкторско-технологических решений при проектировании, создании, эксплуатации и выводе из эксплуатации высокорисковых машин и конструкций с применением комплексных критериев прочности, ресурса, живучести, безопасности и защищенности.

В наибольшей степени актуальность анализа рисков тяжелых катастроф проявляется для критически (КВО) и стратегически (СВО) важных

объектов, к которым и должны быть применены подходы обеспечения их защищенности и безопасности эксплуатации по изложенным выше методологии и критериям рисков на основе результатов диагностики соответствующих определяющих параметров для условий штатных, аварийных и катастрофических ситуаций.

Результаты техногенной диагностики, мониторинга и испытаний материалов и конструкций в настоящее время являются одними из определяющих факторов при комплексном обосновании прочности, ресурса, живучести и безопасности для всех объектов инженерной инфраструктуры. Основной в этом направлении стоит задача комплексного контроля текущего состояния материалов и конструкций на разных стадиях их жизненного цикла, в связи с чем такой контроль должен стать, по крайней мере, трехцелевым (для обеспечения прочности, ресурса и безопасности) и трехпараметрическим (неразрушающим, повреждающим и разрушающим). Только сочетание указанных видов контроля состояния объектов обеспечит прогресс в решении фундаментальных проблем обеспечения эксплуатационной надежности и безопасности машин и механизмов на основе диагностики и мониторинга их состояния и рисков с целью защиты от техногенных аварий и катастроф и поддержания заданного уровня приемлемого риска $R(\tau) \leq [R(\tau)]$.

Создание и использование систем диагностики состояний и мониторинга рисков для обеспечения условий безопасной эксплуатации критически и стратегически важных объектов техносферы с соблюдением новых требований к приемлемым уровням эксплуатационных рисков и к защите этих объектов от тяжелых катастроф составляют суть перехода на новый уровень государственного стратегического планирования, отвечающего стратегии национальной безопасности.

КОМПЛЕКСЫ ИНТЕГРАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ АНАЛИЗА РИСКОВ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ

Махутов Н.А.¹, Разуваев И.В.²

¹ИМАШ РАН, Москва, Россия;

²ЗАО «НПО «АЛЬКОР», г. Дзержинск, Россия

Одной из главных задач систем управления промышленной безопасностью и систем управления жизненным циклом оборудования опасных производственных объектов является идентификация, анализ и прогнозирование рисков. При этом для адекватной количественной оценки вероятности отказа необходимо знание фактического технического состояния оборудования и его изменения в процессе эксплуатации. В докладе рас-

смотрены методы оценки технического состояния оборудования нефтеперерабатывающих производств на основе применения комплексов интегрального мониторинга и методы оптимизации структуры этих комплексов на основе анализа рисков.

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОСНОВНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО, НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО И ХИМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСОВ

Мусатов В.В.
ЗАО «ГИАП-ДИСТЦЕНТР», Москва, Россия

Введение

В рамках современных тенденций по более эффективному использованию технологического оборудования, повышению его производительности, увеличению интервалов между капитальными ремонтами, а также тенденции к усилению контроля в области промышленной безопасности, в нефтехимической и нефтеперерабатывающей отрасли промышленности встал вопрос о создании принципиально новых систем контроля технического диагностирования.

В данном докладе рассмотрено:

1. Проблема контроля оборудования технологических установок.
2. Создание Системы технического контроля оборудования, обеспечивающей промышленную безопасность технологических установок.
3. Ранжирование оборудования с целью распределения его по степени опасности исходя из его фактического состояния и с целью определения уровня его технического диагностирования.
4. Определение зон контроля оборудования.
5. Периодичность контроля оборудования с учетом данных по ранжированию.
6. Выбор средств контроля оборудования.
7. Создание организационной структуры предприятия, обеспечивающей функционирование Систем контроля технического состояния оборудования технологических установок.

Основные результаты

Создание Систем контроля технического состояния основного технологического оборудования предприятий нефтеперерабатывающего, нефтехимического и химического комплексов, позволяет оптимизировать процесс обеспечения промышленной безопасности при эксплуатации технологических установок.

ОПТОВОЛОКОННЫЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРЫ И ДЕФОРМАЦИИ РЕЗЕРВУАРА

Науменко А.П.¹, Бойченко С.Н.¹, Тарасов Е.В.¹, Заренбин А.В.²

¹НПЦ «Динамика», г. Омск, Россия;

²«НЦВО – Фотоника», Москва, Россия

Неразрушающий контроль и техническая диагностика колонно-емкостного оборудования (реактора, колонны, резервуары и т.д.) нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств в процессе эксплуатации на технологическом режиме является важной задачей, решение которой позволяет обеспечить надежность и безопасность взрывопожароопасных производств. В системах компьютерного мониторинга и автоматической диагностики КОМПАКС® применяются практически все виды неразрушающего контроля: вибрационный, акустико-эмиссионный, тепловой, электрический, вихретоковый, акустический, волоконно-оптический. Принципы построения системы КОМПАКС® позволяют обеспечить гибкость и универсальность применяемых методов НК. Система КОМПАКС® обеспечивает получение данных с датчиков различных физических величин и автоматическая экспертная система без участия человека выполняет анализ состояния объекта. В настоящее время НПЦ «Динамика» в сотрудничестве с «НЦВО – Фотоника» решена задача по обеспечению контроля системами КОМПАКС с помощью волоконной оптики. В настоящей статье рассмотрены вопросы применения технологии волоконной оптики в системах КОМПАКС® для обеспечения неразрушающего контроля и технической диагностики колонно-емкостного оборудования в эксплуатации.

Применение волоконно-оптических телеметрических подсистем в системах КОМПАКС® обеспечивают получение информации по температуре и деформации для мониторинга технического состояния по одному волоконному кабелю, чем минимизированы затраты на строительство эстакад и обвязку резервуаров.

Сертификация применения во взрывоопасных зонах волоконно-оптических телеметрических подсистем в составе систем КОМПАКС®, позволяет использовать технологию волоконной оптики для обеспечения неразрушающего контроля и мониторинга технического состояния колонно-емкостного оборудования в эксплуатации.

Применение оптоволоконных датчиков деформации и температуры на технологическом оборудовании с различной температурой стенки от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+500\text{ }^{\circ}\text{C}$ позволяет на рабочем режиме получать данные по изменению напряженно-деформированного состояния материала, контролировать стабильность ведения технологического процесса и обеспечивать предупреждение персонала при возникновении трещинообразования.

Литература

1. **Костюков В.Н.** Мониторинг безопасности производства. М.: Машиностроение, 2002. 224 с.
2. **Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Костюков А.В.** Автоматизированные системы управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств (АСУ БЭР – КОМПАКС®) / под ред. В.Н. Костюкова. М.: Машиностроение, 1999. 163 с.
3. **Симонов М.А., Заренбин А.В.** Волоконно-оптический датчик для измерения температуры в сухих и маслонаполненных трансформаторных реакторах // Materiály IX mezinárodní vědecko – praktická konference «Moderní vymoženosti vědy – 2013». – Díl 76. Technické vědy: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o – 96 stran, P. 54 – 57.
4. **Заренбин А.В., Греков М.В., Васильев С.А., Медведков О.И.** Универсальный волоконно-оптический модульный телеметрический комплекс, регистрирующий модуль, сенсорная головка и модуль расширения числа оптических каналов // Патент на полезную модель № 77420. Оpubл. 20.10.2008. Бюл. № 29.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ УГЛЕПЛАСТИКИ С ИНТЕГРИРОВАННЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ СЕНСОРАМИ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПРЕДДЕФЕКТНОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА

Сорокин К.В., Мурашов В.В.
ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, Москва, Россия

Устоявшееся в настоящее время понятие «интеллектуальные» или «умные» материалы является условным и применяется скорее для краткости. Обычно под интеллектуальным материалом подразумевают материал с встроенными в него системами контроля за его напряженно-деформационным состоянием и различными физико-механическими характеристиками.

Важным достижением материаловедения XX в. является разработка полимерных композиционных материалов (ПКМ): угле-, органо-, стеклопластиков и других высокопрочных ПКМ, позволивших решить проблему создания легких высоконагруженных конструкций авиационной, космической и других отраслей промышленности. Следующий шаг в развитии материаловедения – создание интеллектуальных композитов – материалов, которые помимо основных функций (быть конструкционными материалами), способны контролировать в процессе эксплуатации техническое со-

стояние конструкции, изменять при необходимости ее жесткость или геометрию, осуществлять саморемонт и выполнять другие функции.

Конструкционные ПКМ отличаются своим малым весом, высокими прочностными характеристиками, коррозионной стойкостью и долговечностью эксплуатации конструкций, выполненных из них. Одно из перспективных направлений развития ПКМ – это наделение их специальными свойствами, позволяющими осуществлять перераспределение действующих нагрузок на конструкцию, компенсировать их воздействие, изменять геометрические характеристики конструкции и определять собственные физико-механические параметры.

Интеллектуальные материалы способны выполнять свои функции в ответ на изменение параметров окружающей среды и использовать вложенные при изготовлении изделий сенсорные способности для контроля качества материала. Самодиагностика, самоадаптация, саморемонт и самоуничтожение – вот некоторые функции, которые могут быть интегрированы в высоко структурированных интеллектуальных материалах. Проблема интеллектуальных материалов требует решения широкого спектра вопросов, являющихся не только материаловедческими, но и вопросами неразрушающего контроля, конструирования, приборостроения, информатики и т.д.

Встроенный контроль позволяет регистрировать величину приложенных нагрузок, момент возникновения и последующее развитие дефекта в конструкциях в процессе эксплуатации авиационной техники. Встроенный контроль, включает в себя датчики (сенсорные элементы) и систему сбора и обработки информации с датчиков, которая позволяет получить данные о текущем состоянии труднодоступных и высоконагруженных мест на летательном аппарате, спрогнозировать остаток ресурса конструкции и предупредить о возможном разрушении материала конструкции.

Для того чтобы материал мог называться интеллектуальным, он должен реагировать на внешние воздействия, что невозможно без создания «нервной» системы материала которую можно реализовать с помощью сенсорных элементов. Одними из видов перспективных сенсорных элементов являются волоконно-оптические датчики физических величин на основе решеток показателя преломления. Датчики деформаций могут так же выполнять роль датчиков температуры.

В качестве датчиков (сенсорных элементов) в системах встроенного контроля могут быть использованы электрические, пьезоэлектрические, акустические, тепловые, электромагнитные и другие датчики, закрепляемые в различных точках на поверхности контролируемой конструкции, а также датчики, внедренные в материал, из которого изготавливалась контролируемая конструкция. Контроль с помощью закрепляемых на поверхности конструкции датчиков имеет существенные недостатки, которые свя-

занны с такими факторами, как наличие высокого уровня шумов и вибраций во время полета, сильных электромагнитных полей, а также влияния на результаты контроля качества крепления датчиков. Поэтому основное внимание в ВИАМе было уделено развитию сенсорных элементов, внедренных в материал контролируемой конструкции, имеющих существенные преимущества перед накладными датчиками. В этом случае можно избавиться от необходимости крепления датчиков и практически снимается вопрос зависимости сигнала датчика от электромагнитных полей, шумов и вибраций.

Интеллектуальные материалы могут найти применение в строительстве зданий в сейсмически опасных регионах, в энергетике и для энергетических сооружений, в кораблестроении, авиации и космической отрасли. Материалы, обладающие описанными выше свойствами, являются инструментом, грамотное применение которого современными инженерными науками, позволит снизить массогабаритные характеристики конструкций и повысить безопасность эксплуатации конструкций из композиционных материалов.

Одной из важных задач для повышения безопасности конструкций из ПКМ является прогнозирование развития дефектов и их своевременное выявление. Для выявления дефектов в ПКМ чаще всего применяется ультразвуковая дефектоскопия. Тем не менее, ультразвуковые методы исследований хотя и позволяют определять наличие даже микродефектов, но не могут информировать о возможности образования дефектов [1]. Для прогнозирования развития дефектов часто применяются различные статистические методы и методы экспертных оценок, но все эти методы не являются точными и носят субъективный характер.

В ВИАМе работа по созданию сенсорных элементов ведется по трем направлениям:

- сенсоры на основе оптических волокон с нанесенными волоконными брэгговскими решетками (ВБР) в структуре;
- системы актюирования на основе пьезокерамики (цирконата-титаната свинца);
- емкостные сенсоры, соединенные с индуктивностью в колебательный контур.

Применение в качестве систем актюирования встраиваемых в структуру композиционного материала пьезоэлектрической керамики связано с использованием пьезоэлектрического эффекта, причем наличие прямого и обратного пьезоэффектов обеспечивает значительные преимущества пьезоэлектрических компонентов при создании интеллектуальных материалов. В составе интеллектуального материала они могут выполнять функции сенсоров и активных элементов, управляющих напряженным состоянием материала.

Одним из параметров, который может характеризовать состояние материала, в том числе и преддефектное состояние, является его жесткость [2]. Для имитации изменения жесткости конструкции были изготовлены образцы из ПКМ на основе углеродного наполнителя с интегрированными пьезоактуаторными элементами и датчиками на основе ВБР. Определение изменения жесткости производилось расчетным путем, исходя из измеренных значений отклонения образца от исходного положения, и исходя из изменения значения его деформации, зарегистрированной волоконно-оптическим датчиком на основе ВБР. Предложенный способ диагностики позволяет определить изменение жесткости образцов. В свою очередь изменение жесткости конструкций из ПКМ может служить индикатором наличия структурных изменений и, как следствие, образования дефектов.

В ВИАМ разработан сенсорный элемент на основе ВБР, который полностью удовлетворяет требованиям применения и может быть использован для построения систем контроля напряженно-деформационного состояния конструкций из ПКМ. Разработанный ВБР-датчик обладает высокой чувствительностью и линейностью и адекватно отражает механическую деформацию ПКМ, обеспечивая высокую долговременную стабильность показаний и хорошую линейность отклика.

Температурная чувствительность ВБР в материале практически соответствует температурной чувствительности свободной ВБР. следовательно, дополнительных деформаций ВБР, вызванных несовпадением коэффициентов теплового расширения КМ и материала ВС не наблюдается. Это позволяет использовать хорошо исследованные температурные характеристики ВБР как для компенсации и учета тепловых воздействий, так и для построения систем измерения температуры, или систем комбинированного типа.

Разработанный и сконструированный действующий макет устройства регистрации позволяет надежно регистрировать сигнал, обрабатывать и отображать в удобной для восприятия форме показания ВБР-датчика деформационно-напряженного состояния ПКМ.

Литература

1. **Мурашов В.В.** Определение физико-механических характеристик и состава полимерных композиционных материалов акустическими методами // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 465 – 475.
2. **Сорокин К.В., Мурашов В.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А.** Прогнозирование развития дефектов в конструкциях из ПКМ способом определения изменений жесткости при актюировании материала // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. № 2. С. 20 – 22.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОСВАРНЫХ ТРУБ В ПОТОКЕ ПРОИЗВОДСТВА

Ткаченко А.А.

НИИНК АО «ИНТРОСКОП», Кишинев, Молдова

В докладе представлены интеллектуальные методы и системы неразрушающего контроля, входящие в технологическую структуру процесса производства электросварных прямошовных труб большого диаметра, выполненных сваркой плавлением и обеспечивающие диагностику зон трубы, в которых наиболее вероятно образование дефектов при сварке шва трубы и зон трубы, которые используются при формировании кольцевого сварного шва при строительстве трубопроводов. Исследованы вопросы повышения эффективности автоматизированного ультразвукового контроля сварного шва и концевых участков труб, систематизированы нормативные документы и стандарты, по которым выполняется контроль сварных труб в зависимости от их назначения и области применения.

Основными этапами технологии производства трубы являются: правка листа, контроль геометрии, входной ультразвуковой (УЗ) контроль листа, приварка технологических планок, разделка продольных кромок листа, подгибка кромок листа, U-образная формовка трубной заготовки, O-образная формовка трубной заготовки, гидросбив окалины и сушка трубной заготовки, сварка технологического шва, сварка внутреннего шва, сварка наружного шва. Далее следует технологический этап контрольных операций: визуальный контроль шва и поверхности трубы, технологический автоматизированный ультразвуковой контроль (АУЗК) сварного шва, рентгено-телевизионный контроль (РТК) участков шва, отмеченных АУЗК, ручной ультразвуковой контроль (РУЗК) участков шва, отмеченных АУЗК. Трубы, в которых обнаружены дефекты, направляются на ремонт и возвращаются на повторный контроль, а у бездефектных труб производится обрезка технологических планок, калибровка концов трубы и снятие внутреннего усиления шва на концах труб. После гидроиспытаний выполняется сдаточный этап контрольных операций: АУЗК сварного шва, АУЗК концевых участков трубы, РТК концов сварного шва, магнитно-люминесцентный контроль (МЛК) торцов трубы после снятия фасок на торцах трубы, контроль геометрии. Трубы с дефектами концевых участков направляются на их обрезку, после чего они возвращаются на позицию контроля концов, если обрезка конца невозможна из-за выхода длины за минимальное значение, труба бракуется. На каждую трубу без дефектов формируется электронный паспорт и осуществляется окончательная приемка. На отдельном участке производится нанесение внутреннего и наружного изоляционных покрытий труб и их складирование.

В условиях производства прямошовных труб большого диаметра в ОАО «ВМЗ» на отдельных участках УЗ контроля используются следующие системы и оборудование.

Технологический АУЗК сварных швов осуществляется установками НК 360, 361 (НИИНК АО «Интроскоп» и ИЭС им. Е.О. Патона), созданными на основе ультразвукового многоканального комплекса Интроскоп-02.01, и предназначенными для выявления округлых и плоскостных дефектов продольной и поперечной ориентации по всему объему сварного шва и обеспечивающими обработку, отображение результатов контроля и формирование протокола контроля на каждую трубу. Установки АУЗК оборудованы автоматической звуковой, световой сигнализацией и краскопультами для отметки дефектных участков сварного шва и зон ухудшения качества акустического контакта. На входе участка УЗ контроля установлено лазерное устройство, обеспечивающее слежение акустической системой за сварным швом с точностью ± 1 мм. Для обнаружения продольных и объемных дефектов используются две пары наклонных пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) со щелевым контактом и, в зависимости от толщины стенки трубы, до трех пар сдвоенных локально-иммерсионных преобразователей, работающих по методу «тандем» и позволяющих выявлять и разделять дефекты по толщине сварного шва. Для обнаружения поперечных дефектов в шве применяются одна или две пары локально-иммерсионных преобразователей, расположенных над сварным швом и обеспечивающих ввод ультразвука непосредственно в шов под углом 45° . Фиксация результатов контроля труб производится в памяти вычислительного комплекса установки, с последующей записью на архивные носители.

Установки РУЗК предназначены для перепроверки и оценки дефектности участков сварных швов, забракованных установками АУЗК, но неподтвержденных установками РТК, а также для контроля участков швов, отремонтированных путем удаления дефектов с последующей заваркой и шлифовкой. РУЗК сварных швов осуществляется установками на базе ультразвуковых дефектоскопов УД2-12 (НИИНК АО «Интроскоп»), УДЦ-201П и СКАРУЧ.

АУЗК концов труб выполняется установками НК-362 (НИИНК АО «Интроскоп» и ИЭС им. Е.О. Патона), созданными на основе ультразвукового многоканального комплекса Интроскоп-02.02 и предназначенными для выявления продольных трещин и дефектов типа «расслоение» в металле стенки трубы по периметру концевых участков труб и обеспечивающими обработку, отображение результатов контроля и формирование протокола контроля на каждую трубу. Установки НК-362 оборудованы автоматической звуковой, световой сигнализацией и краскопультами для отметки дефектных зон и участков ухудшения качества акустического контакта. Для контроля труб используется четыре акустических блока, по два на каждом конце, осуществляющие сканирование обеих концов трубы одновре-

менно с объемом контроля до 60 мм за два оборота. Каждый акустический блок состоит из четырех ПЭП, один из которых раздельно-совмещенный используется для обнаружения дефектов типа расслоений в краевой полосе стенки и три наклонных ПЭП – для обнаружения продольных дефектов.

РУЗК сварных швов и концов труб по периметру предназначен для контроля концевых участков сварного шва на длину не менее 250 мм (на обоих концах трубы), не проконтролированных АУЗК, и участков сварного шва с отметками АУЗК, а так же контроль концевых участков труб по периметру с отметками АУЗК концов труб.

Комплекс методов неразрушающего контроля, регламентированных на каждом этапе производства электросварных труб с целью повышения его эффективности, базируется на более чем 30-ти стандартах и нормативных документах, в зависимости от условий последующего применения готовых труб.

Повышение эффективности производства дает возможность одному из ведущих металлургических предприятий отрасли – ОАО «ВМЗ» занимать передовые позиции в поставках труб на строительство магистральных трубопроводов, включая подводные, такие как: Североевропейский газопровод Nord Stream, Сахалин-1, Сахалин-2, Джубга-Сочи, Узбекистан-Китай, Южный Поток и др.

РОЛЬ НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ МЕТАЛЛОГРАФИИ В ОЦЕНКЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА

Филинов М.В., Фурсов А.С.
ООО «НПК «МИКРОКОН», Москва, Россия

В связи со значительным износом оборудования при неполной информации об истории его нагрузок и перегрузок постоянно увеличивается количество потенциально опасных промышленных объектов. Определение остаточного ресурса, диагностика состояния и продление сроков эксплуатации объектов – важнейшие задачи, решаемые в настоящее время во всех отраслях российской промышленности.

Параметры структуры металла (например, балл зерна), из которого изготовлен объект, определяют прочность, остаточный ресурс и влияют на развитие макродефектов, являются. В ходе эксплуатации в металле происходят изменения, связанные с процессами старения, межкристаллитной коррозии, обезуглероживания, с ростом зерна, сфероидизацией перлита и т.п. Все эти изменения могут быть оценены с помощью металлографического анализа.

Для определения остаточного ресурса требуется выявлять ранние стадии развития макродефектов, в то время как классическая дефектоскопия

предполагает обнаружение и классификацию уже имеющихся, развившихся дефектов.

Классическая разрушающая металлография снижает остаточный ресурс объекта, так как уже само исследование предполагает нарушение сплошности объекта; восстановление после исследования (например, сваркой) создает центры развития коррозии.

Для решения задач неразрушающей металлографии ООО «НПК «МИКРОКОН» созданы и развиваются метрологически обеспеченные аппаратно-программные комплексы МИКРОКОН МЕТ, включающие портативный металлографический микроскоп, фотоканал для получения изображений и вычислительную часть с программным пакетом MICROKON MET.

Комплексы МИКРОКОН МЕТ позволяют:

- проводить полный цикл неразрушающей металлографии от подготовки шлифа до получения отчета непосредственно на объекте контроля;
- проводить количественную оценку структуры черных и цветных металлов в соответствии с наиболее часто применяемыми ГОСТ и РД;
- накапливать базу исследований.

В современной промышленности большое количество изделий изготавливается из цветных металлов, поэтому ООО «НПК «МИКРОКОН» были разработаны процедуры анализа изображения с выделением и анализом объектов по цвету, а не только по яркости, как при анализе черных металлов. Это позволяет оценивать параметры структуры изделий из меди, получать более точные количественные результаты при анализе шлифов под травлением.

ООО «НПК «МИКРОКОН» также разработаны алгоритмы повышения точности определения размеров объектов при работе с нерезкими и, при некоторых ограничениях, со смазанными из-за трудных условий съемки изображениями.

СЕКЦИЯ 8. ВИБРОДИАГНОСТИКА

Руководители секции: Зусман Г.В., Костюков В.Н.

АППРОКСИМАЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ ВИБРОСКОРОСТЕЙ ДЛЯ ДОПЛЕРОВСКИХ СИСТЕМ АКУСТИЧЕСКОГО, РАДИО И ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНОВ

Гетманов В.Г.^{1,2}, Фирсов А.А.²

¹Геофизический Центр РАН, Москва, Россия;

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия

Рассматриваются доплеровские системы, работающие в акустическом, радио и оптическом диапазоне, предназначенные для оценивания виброскоростей в задачах контроля и диагностики механических объектов. Здесь предлагается единая технология цифровой обработки сигналов в доплеровских системах для вычисления оценок виброскоростей, основанная на применении аппроксимационных алгоритмов.

Для доплеровских акустических систем предполагается, что на вибрирующем объекте располагается тональный источник звука. Доплеровская виброскорость объекта модулирует частоту излучаемого тонального звукового сигнала. Звуковой сигнал воспринимается микрофоном и усиливается. Сформированный подобным образом доплеровский сигнал от усилителя поступает на АЦП и далее в ПЭВМ для реализации цифровой обработки и оценивания доплеровской виброскорости.

Для доплеровских радиосистем объект, перемещающийся с виброскоростью, облучается непрерывным радиосигналом с постоянной несущей частотой. В отраженном радиосигнале частота модулируется доплеровской скоростью. В блоке гетеродина из излученного и принятого сигналов выделяется доплеровский сигнал, который поступает в АЦП и ПЭВМ для вычисления оценок доплеровской виброскорости.

Для доплеровских оптических систем вибрирующий объект со специальной наклеенной отражающей пленкой, реализующей круговую диаграмму отражения, облучается непрерывным лазерным сигналом. В отраженном оптическом сигнале образуется доплеровский сдвиг частоты. Прямой и отраженный оптический сигнал попадают на апертуру фотоприемника, далее сигнал фотоприемника усиливается. Сформированный доплеровский сигнал поступает на АЦП и ПЭВМ для вычисления оценок доплеровской виброскорости.

Описанные доплеровские системы, различные конструктивно, формируют одинаковые по своей структуре доплеровские сигналы. Общеизвестно, что доплеровская частота $f_d(Ti)$ в доплеровском сигнале связана с доплеровской скоростью $v_d(Ti)$ следующим соотношением:

$$f_d(Ti) = f_0(1 - \alpha v_d(Ti)/c_0),$$

где f_0 – несущая частота; c_0 – скорость звукового, радио или оптического сигнала; $\alpha = 1$ – для акустической системы; $\alpha = 2$ – для радио и оптической системы.

Оценивание функций доплеровских виброскоростей осуществляется на основе единой технологии аппроксимационных алгоритмов, состоящей в построении системы локальных интервалов и системы локальных аппроксимационных моделей, формировании локальных функционалов и решении задач локальной аппроксимации [1].

Пусть произведены дискретизованные наблюдения доплеровского сигнала $Y(Ti)$, $i = 0, 1, \dots, N_f - 1$, T – шаг дискретизации. Введем систему локальных интервалов на временном интервале наблюдения $(0, t_f)$. К локальному интервалу с номером j принадлежат точки $N(j-1) + 1 \leq i \leq Nj - 1$, $j = 1, \dots, m$, N – число точек на локальном интервале, $Nm = N_f$, $N_j T = t_f$. Будем полагать, что на локальных интервалах, которые выбраны таким образом, что являются малыми по времени, амплитудные и частотные функции наблюдаемых сигналов изменяются незначительно. Тогда, на локальных интервалах для наблюдаемых доплеровских сигналов можно ввести локальные модели в виде кусочно-синусоидальных функций с постоянными амплитудами и частотами:

$$y_M(c_j, Ti) = a_j \cos \omega_j Ti + b_j \sin \omega_j Ti, \quad i = 0, 1, \dots, N - 1, \quad j = 1, \dots, m,$$

где $\tilde{n}_j^T = (a_j, b_j, \omega_j)$ – амплитудные и частотные параметры локальных моделей. На основе локальных наблюдений и локальных моделей сформируем локальные функционалы:

$$\begin{aligned} S(c_j, Yi) &= \sum_{i=0}^{N-1} (Y(\dot{O}(i + N(j-1))) - y_M(c_j, Ti))^2 = \\ &= \sum_{i=0}^{N-1} (Y(\dot{O}(i + N(j-1))) - a_j \cos \omega_j Ti - b_j \sin \omega_j Ti)^2. \end{aligned}$$

Физический смысл локальных функционалов очевиден. Оценивание параметров c_j^0 будем осуществлять на основе задач локальной аппроксимации, сводящихся к минимизации функционалов $S(c_j, Yi)$:

$$c_j^0 = \arg \left\{ \min_{c_j} S(c_j, Yi) \right\}, \quad j = 1, \dots, m.$$

Для оценок локальных функций частоты справедливы следующие соотношения $\omega_j^0(Ti) = \omega_j^0$, для $N(j-1) + 1 \leq i \leq Nj - 1$, $\omega_j^0(Ti) = 0$ для $i < N(j-1) + 1$, $i = Nj - 1$. Тогда, оценки доплеровских частотных функций $f_d^0(Ti)$ в виде кусочно-постоянных функций представляется следующим образом:

$$f_d^0(Ti) = \sum_{j=1}^m \omega_j^0(Ti) / 2\pi, \quad i = 0, 1, \dots, N_f - 1.$$

Оценка функции доплеровской скорости объекта производится с использованием соотношения:

$$v_d^0(Ti) = (1/\alpha - f_d^0(Ti)/\alpha f_0) c_0.$$

Предложенная математическая технология позволяет получать в сложных системах экспериментальной механики оценки функций виброскоростей, которые стандартными методами реализуются не в полной мере эффективно.

Опишем пример применения разработанной технологии формирования алгоритмов для оценивания виброскорости снаряда в стволе орудия [2]. На рисунке 1 представлена упрощенная блок-схема модельной доплеровской системы для радиодиапазона.

Работа алгоритма оценивания доплеровской виброскорости была протестирована на компьютерной модели. С этой целью была сформирована модель наблюдений виброскорости снаряда в виде экспоненциально нарастающей с колебаниями функции. На основе данной модели была реализована модель наблюдений доплеровского сигнала.

Далее, на основе модельных наблюдений был применен алгоритм построения локальных аппроксимационных моделей и вычисления локальных оценок виброскоростей. На рисунке 2 представлен результат работы

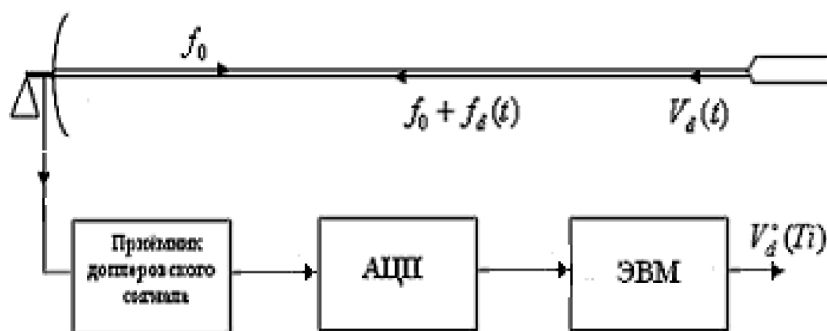


Рис. 1. Доплеровская система для радиодиапазона

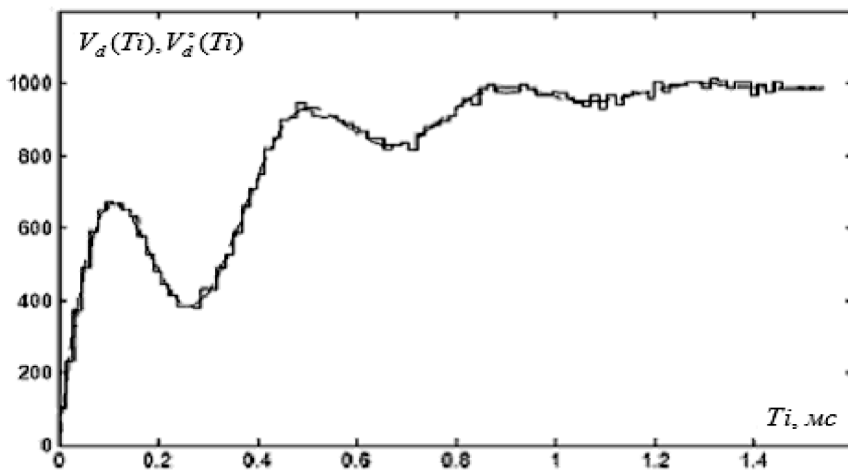


Рис. 2. Результат оценивания доплеровской виброскорости

разработанного алгоритма. Локальные оценки виброскорости представлены в виде кусочно-постоянной функции. Видно, что разработанный алгоритм решает задачу оценивания виброскорости. Примеры реализации аппроксимационных алгоритмов оценивания виброскорости для акустического и оптического диапазонов представлены в [3, 4]. Предложенные аппроксимационные алгоритмы оценивания виброскоростей могут быть эффективно применены в доплеровских системах контроля и диагностики.

Литература

1. Гетманов В.Г. Цифровая обработка нестационарных колебательных сигналов на основе локальных и сплайновых моделей. М.: Изд-во НИЯУ МИФИ, 2011. 298 с.
2. Гетманов В.Г., Фирсов А.А. Применение аппроксимационных алгоритмов в радиолокационной системе измерения доплеровских скоростей: 14-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA–2012». Сб. докл. 2012. Т. 1. С. 65 – 68.
3. Гетманов В.Г., Фирсов А.А. Оценивание параметров движения источника звука на основе цифровой обработки системы доплеровских гидроакустических сигналов // Акустический журнал. 2011. Т. 57. № 4. С. 479 – 484.
4. Гетманов В.Г., Кузнецов П.А., Тертышный Г.Г. Применение аппроксимационных алгоритмов в лазерном компьютерном виброметре // Измерительная техника. 1997. № 7. С. 34 – 37.

НОВЫЙ ЭФФЕКТ В ДИНАМИКЕ МЕХАНИЧЕСКОГО КОНТАКТА МЕТАЛЛ-МЕТАЛЛ И ВИБРОДИАГНОСТИКА ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ПЕРЕНОСНЫМИ ПРИБОРАМИ

Зусман Г.В.

PCB Piezotronics и НИИИИИ

Обнаружен новый эффект в динамике механического контакта металл-металл, который проявляется в линейности и стабильном наклоне (около – 15 дБ на октаву) резонансной частотной характеристики такого контакта. Дополнительно к этому показано, что положение резонансной частотной характеристики пропорционально силе прижатия в контакте. В докладе приведены экспериментальные и теоретические данные подтверждающие эффект. С точки зрения применения обнаруженный эффект позволяет создать переносные приборы для надежной диагностики подшипников качения в диапазоне частот 4...20 кГц, при этом без подготовки поверхности и проведении измерений ручным датчиком со щупом в любом месте корпуса подшипника. В качестве примера в докладе рассмотрен виброметр серии 805 компании Fluke, в котором диагностика подшипников качения реализована на описанном эффекте.

ВИБРОДИАГНОСТИКА ПОГРАНИЧНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Карасев В.А.¹, Петров Н.И.¹, Николаев С.М.¹, Назаренко Г.М.¹,
Лаврентьев Ю.Л.¹, Жильников Е.П.², Кондратьев М.И.², Волков Е.С.²
¹ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» ЦИАМ, Москва, Россия
²ЦСКБ ОАО «ЕПК Самара», Россия

Объектом исследования являются шариковые подшипники, применяемые в опорах роторов авиационных двигателей и опорах агрегатов.

Цель работы – исследование виброхарактеристик подшипников с внешними дефектами и разработка перспективных методов вибродиагностики технического состояния неразборных шарикоподшипников путем измерения вибрации непосредственно на подшипнике.

В процессе работы проводились экспериментальные исследования вибрации неразборных подшипников типа 75-205P2 на приводных установках в условиях осевой нагрузки 75 Н и частоте вращения вала 30 с⁻¹.

Проведены исследования подшипников без повреждений и подшипников с искусственно внесенными повреждениями, размеры которых, в соответствии с нормативными требованиями, допускают повторное использование этих подшипников в ГТД и редукторах (пограничное повреждение).

Проведенные эксперименты показали, что, несмотря на слабую виброактивность, пограничные локальные повреждения подшипника оказывают существенное влияние на характер и уровень его вибрации. Показано, что это влияние обнаруживается более детальным анализом вибросигнала, например, измерением уровня в октавных полосах частот и анализом формы сигнала, а также анализом огибающей сигнала.

Экспериментально подтверждено, что на характер и уровень вибрации подшипника значительное влияние оказывает положение датчика вибрации относительно места локального повреждения наружного кольца. Это следует учитывать в методах контроля и диагностирования технического состояния подшипников с помощью датчиков, расположенных непосредственно на подшипнике или вблизи него.

Проведенные эксперименты показали значимую разницу частот прокатывания шариков по дорожкам для подшипника с увеличенным радиальным зазором и для подшипников с нормальным радиальным зазором. Такой результат подтверждает возможность вибрационного диагностирования изменения величины радиального зазора путем измерения частот прокатывания шариков по дорожкам.

Таким образом, впервые подтверждены возможности обнаружения пограничных локальных повреждений неразборных шарикоподшипников и увеличенного радиального зазора вибродиагностическими методами в условиях осевого нагружения подшипника.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ХЕРСТА ДЛЯ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСНОГО АГРЕГАТА

Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Павленков Д.В.
НПЦ «Динамика», г. Омск, Россия

В настоящее время основным методом определения технического состояния центробежного насосного агрегата (ЦНА) является вибродиагностический метод, где производится анализ сигналов вибрации корпуса насосного агрегата [1]. При этом чаще всего используется спектральный анализ сигналов, где гармоническим составляющим спектра ставятся в соответствие те или иные дефекты [2, 3]. Однако использование спектрального анализа требует точной информации о типе и конструкции агрегата, режи-

ма его работы, которая в условиях реального производства может быть неточной или вовсе отсутствовать. Это может приводить к ошибкам определения состояния. Таким образом, актуальной является задача исследования новых методов диагностики с использованием алгоритмов, инвариантных к конструкции и типу агрегата.

В докладе рассматривается использование для диагностики ЦНА одного из методов нелинейной динамики – фрактальной размерности, где в качестве диагностического признака используется коэффициент фрактальной размерности Херста (H). Основным достоинством данного признака является инвариантность к уровню анализируемого сигнала, а, следовательно, независимость от размерно-мощностных параметров агрегата.

Приводятся результаты исследований использования коэффициента размерности Херста к выявлению кавитационного режима работы агрегата, которые проводились на системе КОМПАКС-РПГ стенда испытаний насосных агрегатов. Показано, что чувствительность коэффициента находится на уровне, а в некоторых случаях превышает чувствительность основного спектрального признака кавитации – уровня лопаточных гармоник.

Таким образом, использование коэффициента размерности Херста позволяет повысить достоверность вывода экспертной системы диагностики технического состояния центробежного насосного агрегата.

Литература

1. **Костюков В.Н.** Мониторинг безопасности производства. М.: Машиностроение, 2002. 224 с.
2. **Костюков В.Н., Науменко А.П.** Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 200100 – «Приборостроение» и приборостроительным специальностям. Омск: ОмГТУ, 2011. 360 с.
3. **Костюков В.Н., Науменко А.П.** Практические основы виброакустической диагностики машинного оборудования: Учебное пособие / Под ред. В.Н. Костюкова. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2002. 108 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ УЗЛОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ РЕЛЬСОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Костюков Ал.В., Цурпаль А.Е., Басакин В.В.
НПЦ «Динамика», г. Омск, Россия

В процессе эксплуатации рельсового подвижного состава наиболее ответственные узлы, подверженные внезапным отказам, являются лимитирующими для подвижного состава в целом. К ним в первую очередь относятся узлы электрического и механического оборудования, устранение неисправностей которых в процессе эксплуатации затруднено.

Наиболее эффективными методами обнаружения неисправностей роторного механического оборудования являются тепловой и виброакустический, однако, тепловой метод позволяет лишь констатировать факт начавшегося разрушения узла, либо выявлять дефекты на поздней стадии их развития, в то время как виброакустический метод неразрушающего контроля позволяет обнаруживать как зарождающиеся, так и развитые дефекты.

Наличие большого числа помех, высокого уровня шумовых составляющих, сопутствующих взаимодействию колеса и рельсовой колеи стали основанием для формирования мнения о том, что обеспечение объективной виброакустической диагностики технического состояния роторного механического оборудования подвижного состава в процессе эксплуатации сложно достижимо, а подчас невозможно.

Между тем, даже для достижения динамической ошибки на уровне 1 % (для ответственного оборудования приемлемый уровень ошибки составляет 0,1 %) требуется осуществлять диагностику с интервалом не более 2 ч [1 – 3], что может быть реализовано исключительно путем внедрения и применения бортовых систем мониторинга технического состояния.

Целью проведенного исследования является определение наиболее информативного, с точки зрения виброакустической диагностики, диапазона частот сигнала вибрации для разработки экспертной системы и организации мониторинга технического состояния рельсового подвижного состава.

Для достижения поставленной цели была разработана экспериментальная установка на базе восьмиканального АЦП с результирующей разрядностью 16 бит и полосой пропускания до 2 МГц. Параметры экспериментальной установки обеспечили возможность параллельной записи сигналов вибрации с частотой дискретизации 262 кГц неограниченной длительности. Для измерения частоты вращения колесных пар были задействованы штатные датчик пути и скорости системы КЛУБ-У, установленные на первой и второй колесных парах головного вагона электропоезда. Кроме того, в процессе записи сигналов вибрации проводилось измерения напряжения на проводах цепей управления электропоезда, что позволило в процессе анализа сигналов определить режим движения электропоезда в каждый момент времени записи сигналов. Для измерения вибрации использовались пьезоэлектрические акселерометры, устанавливаемые на буксовые узлы колесных пар и подшипниковые щиты тяговых электродвигателей. Экспериментальная установка, включающая восьмиканальный АЦП и акселерометры обеспечила динамический диапазон записи сигналов не менее 74 дБ.

Для анализа полученных сигналов была разработана методика, заключающаяся в разделении частотного диапазона полученных сигналов на восемь октавных полос и анализе зависимостей среднеквадратичных значений виброускорения, виброскорости и виброперемещения, а также среднеквадратичных значений переменной составляющей огибающей виброускорения и дискретных составляющих спектра огибающей виброускорения, соответствующих частотам проявления тех или иных дефектов от частоты вращения колесной пары и режима движения электропоезда.

На основе первичного анализа данных было установлено, что уровень параметров вибрации одного из тяговых электродвигателей значительно отличается от уровней параметров вибрации остальных электродвигателей, установленных на этом же вагоне. Данный факт позволил выдвинуть гипотезу о наличии неисправности тягового электродвигателя.

Проведенный анализ показал, что на уровень параметров вибрации в различных полосах частот существенное влияние оказывает скорость движения и режимы работы подвижного состава. Установлено также, что для узлов с различным техническим состоянием характер данного влияния различен.

Дискретные составляющие спектра огибающей виброускорения, соответствующие частотам проявления тех или иных дефектов, проявляются в различных скоростных режимах, что должно быть использовано при разработке экспертной системы.

В результате проведенных исследований установлены характеристики распределения параметров вибрации узлов подвижного в процессе движения электропоезда в различных частотных полосах и скоростных диапазонах, определено влияние воздействий, формируемых от переменных скоростных и динамических режимов работы.

Результаты исследования предполагается использовать при разработке экспертной системы, реализуемой в бортовых системах мониторинга состояния оборудования подвижного состава.

Литература

1. **Костюков В.Н.** Безопасная ресурсосберегающая эксплуатация МВПС на основе мониторинга в реальном времени / В.Н. Костюков, С.В. Сизов, В.П. Аристов, Ан.В. Костюков // Наука и транспорт. 2008. С. 8 – 13.
2. **Сизов С.В., Аристов В.П., Костюков В.Н., Костюков А.В.** Непрерывный мониторинг состояния моторвагонного подвижного состава // Железнодорожный транспорт. 2008. № 6. С. 41–42.
3. **Костюков В.Н.** Мониторинг безопасности производства. М.: Машиностроение, 2002. 224 с.

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ВИБРОДИАГНОСТИРОВАНИЯ РОТОРНЫХ АГРЕГАТОВ

Костюков Ал.В., Зайцев А.В., Казарин Д.В.
НПЦ «Динамика», г. Омск, Россия

В настоящее время существует проблема, связанная со снижением качества ремонта электропоездов проводимого в моторвагонных депо. Для повышения эксплуатационной надежности парка электропоездов необходимо внедрение в моторвагонных депо современного диагностического

оборудования. Наиболее значимым узлом электропоезда, отвечающим за безопасность перевозок, является колесно-моторный блок (КМБ). При проведении работ по определению технического состояния КМБ используют различные средства и методы оценки состояния. Для повышения технологичности определения технического состояния КМБ используют безразборные методы диагностирования, для реализации которых используют различные средства технического диагностирования. Основным методом оценки технического состояния узлов КМБ, является виброакустический метод.

В моторвагонных депо широко используются системы виброакустической диагностики «КОМПАКС®-ЭКСПРЕСС», предназначенные для оценки технического состояния КМБ моторвагонного подвижного состава в процессе проведения плановых работ по ремонту и техническому обслуживанию.

Целью технической диагностики является повышение надежности и ресурса технических систем [1]. Основной задачей диагностирования является распознавание технического состояния узлов и агрегатов и разделение его на классы исправное и неисправное, что связано с риском ложной тревоги и пропуска дефекта. Данная работа посвящена повышению достоверности диагностирования технического состояния роторных агрегатов при одновременном снижении трудоемкости его применения.

Проведен анализ геометрических параметров подшипникового узла [2], в результате которого установлена зависимость уровня вибрации от частоты вращения и размера дефекта. Согласно данной зависимости величина амплитуды вибросигнала пропорциональна частоте вращения подшипника и размеру дефекта. С помощью систем «КОМПАКС®-ЭКСПРЕСС» проверена адекватность установленной зависимости. Исключить ошибку диагностирования, связанную с наличием вероятности ложной тревоги и пропуска дефекта, можно используя зону неопределенности, ограниченную нижним и верхним критическими значениями.

Разработан способ, уменьшающий ошибку диагностирования путем использования зоны неопределенности, включающий дополнительное независимое испытание. Таким образом, использование зоны неопределенности при оценке технического состояния, а также двух независимых испытаний, увеличивающих трудоемкость его применения не более чем в 2 раза, обеспечивает повышение достоверности диагностирования технического состояния роторных агрегатов более чем на порядок.

Литература

1. **Биргер И.А.** Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 240 с. ил.
2. **Костюков В.Н., Зайцев А.В., Басакин В.В.** Исследование вибрации подшипниковых узлов подвижного состава при изменении частоты вращения. Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повыше-

ние эффективности тяги поездов: Материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2012. С. 92 – 97.

ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ОБОРУДОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА

Костюков В.Н.

НПЦ «Динамика», г. Омск, Россия

Безопасная ресурсосберегающая эксплуатация оборудования в промышленности и на транспорте является весьма актуальной задачей. Современные производства различных отраслей содержат тысячи единиц различных механизмов и машин, техническое состояние которых определяет уровень безопасности жизнедеятельности не только в рамках этих предприятий. Мониторинг технического состояния оборудования обеспечивает наблюдаемость и позволяет реализовать безопасную ресурсосберегающую технологию эксплуатации и ремонта оборудования. Мониторинг технического состояния оборудования опирается на методы технической диагностики. Наиболее распространенным методом технической диагностики машинного оборудования в промышленности и на транспорте является виброакустический метод. В основе метода лежит оценка параметров виброакустических сигналов, полученных путем селекции шумовых и периодических компонент сигнала во временной и частотной областях (ШПС), с целью установления диагностических признаков, тесно связанных со структурными параметрами, определяющими техническое состояние машины. Диагностические признаки определяют различные классы неисправностей машины и для получения высокой достоверности диагностики важно обеспечить такой вектор диагностических признаков, который минимальным количеством признаков охватывает все возможные классы неисправности машин. Диагностические признаки такого вектора называют ортогональными (независимыми). Некоторые диагностические признаки позволяют обнаружить широкий класс неисправностей машины, другие – указывают на вполне конкретную неисправность. Поэтому сначала оценивают первые, обеспечивая полноту диагностики, а далее путем оценки вторых уточняют неисправность, обеспечивая требуемую глубину диагностики. Достоверность диагностики технического состояния машины определяет статическую ошибку мониторинга. Динамическая ошибка мониторинга определяется временным интервалом диагностики (интервал мониторинга) и для разных машин, участвующих в разных процессах на производстве и на транспорте, требования к интервалу мониторинга различны и определяются динамикой развития их неисправностей. Поэтому для повышения

достоверности мониторинга задействуют скорости роста диагностических признаков и проводят анализ трендов вибрации на присутствие экспоненциального роста, характеризующего опасный износ оборудования. Важное значение имеет ошибка предотвращения внезапного отказа оборудования из-за человеческого фактора. Именно на это направлены интеллектуальные возможности систем по исключению человека из процессов измерения, извлечения, интерпретации диагностической информации и выдачи предписаний персоналу по безопасной ресурсосберегающей эксплуатации оборудования производственно-транспортного комплекса. В работе рассматривается опыт эксплуатации систем мониторинга технического состояния оборудования опасных производств энергетического комплекса, горнодобывающей и металлургической промышленности, железнодорожного транспорта. Показано отличие систем мониторинга параметров оборудования от систем мониторинга технического состояния. Системы мониторинга параметров измеряют параметры физических процессов, однако они не определяют причины их изменения. Системы мониторинга состояния определяют не только изменение технического состояния объекта мониторинга, но и причины его изменения. Эти системы используют алгоритмы автоматической экспертной системы поддержки принятия решений реального времени с автоматическим диагностированием неисправностей узлов оборудования, автоматически указывают персоналу, какие действия он должен произвести, чтобы устранить неисправности. Иногда такие системы в России называют системами вибродиагностического мониторинга. Термин «реальное время» при мониторинге состояния означает, что темп измерения определяющих параметров, распознавание состояния и отображение результатов диагностики объекта должен быть согласован с темпом его деградации и в несколько раз опережать его для устранения выбросов и повышения достоверности диагноза, создавая резерв времени на принятие управленческих решений и выполнение компенсирующих мероприятий. Приведены технические и экономические показатели эффективности применения систем мониторинга.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ТЕХНОЛОГИИ ВИБРОДИАГНОСТИРОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА ПОРШНЕВЫХ МАШИН В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Науменко А.П.
НПЦ «Динамика», г. Омск, Россия

В основе технологии мониторинга и диагностирования поршневых машин (ПМ) лежит сбор и обработка данных, которые должны обеспечить определение дефектов и неисправностей ПМ с заданной глубиной их детализации и достоверностью, степени их опасности. Реализация технологии

основывается на использовании моделей структуры виброакустических (ВА) сигналов при возникновении различных дефектов и неисправностей узлов и деталей ПМ, совокупности диагностических признаков (ДП) неисправностей и параметров сигналов при возникновении неисправностей (ДПН), их нормативных значений, способов преобразования ВА сигнала и системы оценок параметров ВА сигналов. Одним из практических путей реализации технологии и решения задач мониторинга и диагностики ПМ является внедрение указанных решений, которые лежат в основе базы знаний, связывающей ДПН и технические состояния (ТС) узлов и деталей ПМ, в алгоритмы функционирования системы диагностики и мониторинга (СДМ) КОМПАКС®.

Исходя из сформировавшейся базы знаний, сформирована методология обработки анализа диагностических параметров ВА сигналов, которую в представлении в следующем виде:

- интегро-дифференциальное преобразование (например, виброскорость);
- дисперсионный анализ;
- амплитудно-фазовый анализ (напр., анализ параметров сигнала по углу поворота вала);
- амплитудно-частотный анализ (напр., выделение и анализ параметров сигнала в характерной области частот);
- анализ параметров огибающей сигнала, выделенной в характерных диапазонах частот, которые определяются свойствами диагностируемых узлов и деталей.

Предложенная методология мониторинга и диагностирования, которая основана на измерении параметров косвенных процессов (ВА колебаний), позволяет реализовать алгоритмы экспертной системы поддержки принятия решений реального времени с автоматическим определением (поставкой диагноза в темпе измерения диагностических сигналов) более 20 неисправностей узлов, например, поршневых компрессоров (ПК) опасных производств, степени их опасности и выдачи целеуказующих предписаний персоналу по приведению компенсирующих мероприятий.

Как и любой алгоритм или схема распознавания образов, схема ВА диагностирования технического объекта состоит из собственно объекта диагностирования с набором технических состояний, подлежащих распознаванию, набора диагностических признаков и правил принятия решения. На основе всестороннего изучения объекта диагностирования, его источников диагностического сигнала и их реакций на изменение ТС, появления дефектов и неисправностей узлов и деталей объекта диагностирования разрабатывается диагностическая модель. Свойства диагностической модели определяют требования к диагностическому сигналу и его параметрам, которые определяют возможности выделения диагностических параметров неисправностей в требуемом объеме, количестве и качестве, которые обла-

дают требуемыми избирательными свойствами к заданным классам дефектов и неисправностей, подлежащих распознаванию, а также к свойствам и параметрам измерительного тракта.

Адекватность диагностической модели возможным ТС определяет возможность формирования совокупности ДПН и синтеза ДП, которые образуют матрицу ДП, определения количественных параметров ДПН, формирующих эталоны ДПН и ДП, а также формирования набора решающих правил, которые и определяют вид ТС, неисправности или дефекта и их опасности.

Выделение совокупностей ДПН из параметров диагностического сигнала и формирование ДП производится на основе матрицы ДП и их эталонов. В результате формируется система ДП, содержащихся в диагностическом сигнале, с количественной оценкой как каждого ДПН, так и в ДП целом. На основе системы решающих правил, которые определяют степени опасности и серьезности выявленных неисправностей, производится классификация состояний и осуществляется постановка диагноза по данным текущих измерений диагностических параметров. Глубина диагностирования определяется свойствами диагностической модели и объемом измеряемых ДП. Последнее является весьма важным фактором, так как ограничение на объем измеряемых диагностических параметров в реальных условиях эксплуатации СДМ, может при адекватной диагностической модели существенно уменьшить глубину диагностирования. Функция управления объектом в соответствии с принятым решением о его фактическом состоянии обеспечивает: аварийное отключение, перевод на щадящий режим, включение резервов и т.д.

Алгоритм функционирования автоматической экспертной системы включает вычисление величин ДПН, на основе данных об их нормативных значениях, формирование совокупностей ДП, соответствующих классам неисправностей, формирование сообщений экспертной системы.

Одной из проблем разработки алгоритмов функционирования является разделение ДПН, входящих в пересекающиеся и непересекающиеся классы неисправностей. Например, в ВА диагностике широко используется средние квадратические значения (СКЗ) таких вибропараметров, как виброускорение (A_{rms}), виброскорость (V_{rms}), виброперемещение (S_{rms}). Однако использование при диагностировании ПМ только признака $[A_{rms}]$ позволяет судить о широком классе неисправностей, охватывающих ряд подклассов. Использование в качестве ДП амплитудных величин вибропараметров AVS (A_{peak} , V_{peak} , S_{peak}) дает возможность выделить другие классы неисправностей, отдельные подклассы которых могут пересекаться с подклассами СКЗ AVS. Однако появление в диагностическом сигнале, например, признаков $[A_{rms}]$ и $[A_{peak}]$ совместно свидетельствует о возникновении непересекающегося подкласса неисправностей. Автоматическое разделение классов неисправностей и соответствующих им экспертных сообщений основывается на

присвоении ценности диагностическим признакам, возникающим как совместно, так и отдельно с учетом соответствия одинаковых классов неисправностей ДП, полученным с других датчиков. Экспертные сообщения ДП с более высокой ценностью вытесняют экспертные сообщения с более низкой ценностью, что позволяет исключить появление сообщений о пересекающихся классах неисправностей при наличии совокупностей ДПН, позволяющих разделить их на непересекающиеся классы.

На основе многолетнего опыта диагностирования и мониторинга состояния ПК опасных производств сформирована система ДП дефектов, неисправностей, нарушений технологического режима компримирования и других причин виброактивности ПК и сформирована база знаний причинно-следственных связей ДП и классов пересекающихся и непересекающихся неисправностей, а также соответствующих им экспертных сообщений с учетом ценности ДП.

Предложенные принципы технологии диагностики и мониторинга ПМ, подтвержденные многолетним опытом практической эксплуатации СДМ, свидетельствует о том, что при использовании всего пяти датчиков ВА сигнала на ПК (на цилиндре в осевом направлении, нагнетательных и впускных клапанах, крейцкопфе, коренном подшипнике), датчика углового положения вала и датчика на ПК со стороны привода или на подшипнике привода, формируется 15 ДПН по параметрам ВА сигналов, с помощью которых СДМ по безусловному алгоритму в автоматическом режиме определяет 36 причин виброактивности ПК. При этом обеспечивается контроль возникновения почти 80 % отказов от общего объема наиболее частот возникающих.

Литература

1. **Костюков В.Н.** Мониторинг безопасности производства. М.: Машиностроение, 2002. 224 с.
2. **Науменко А.П.** Научно-методические основы вибродиагностического мониторинга поршневых машин в реальном времени. Омск: ОмГТУ, 2012. 40 с.
3. **Костюков В.Н., Науменко А.П.** Нормативно-методическое обеспечение мониторинга технического состояния поршневых компрессоров // Контроль. Диагностика. 2005. № 11. С. 20 – 23.
4. **Костюков В.Н., Науменко А.П.** Проблемы и решения безопасной эксплуатации поршневых компрессоров // Компрессорная техника и пневматика. 2008. № 3. С. 21 – 28.
5. **Костюков В.Н., Науменко А.П.** Решения проблем безопасной эксплуатации поршневых машин // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 3. С. 27 – 36, 1-я, 4-я с. обл.

6. **Костюков В.Н., Науменко А.П.** Система контроля технического состояния машин возвратно-поступательного действия // Контроль. Диагностика. 2007. № 3. С. 50 – 59.

7. **Костюков В.Н., Науменко А.П., Бойченко С.Н.** Способ вибродиагностики технического состояния поршневых машин по спектральным инвариантам: пат. 2 337 341 Рос. Федер. № 2007113529/28; заявл. 11.04.2007; опубл. 27.10.2008. Бюл. № 30.

8. **Стандарты** в области мониторинга технического состояния оборудования опасных производств / Костюков В.Н., Науменко А.П. и др. // Безопасность труда в промышленности. 2012. № 7. С. 30 – 36.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОБСТВЕННЫХ ФОРМ КОЛЕБАНИЙ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ С ЛОКАЛЬНЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ НА ВИБРОСИГНАЛЫ

Николаев С.М., Карасев В.А., Петров Н.И.,
Лаврентьев Ю.Л., Назаренко Г.М.
ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва, Россия

Введение

Возможности совершенствования методов вибрационной диагностики и прогнозирования технического состояния подшипников опор роторов авиадвигателей связаны с успехами в современном развитии средств измерений и более детальным изучением вибрации подшипников.

В рамках настоящей работы продолжены исследования вибрации подшипников, с помощью датчиков, расположенных непосредственно на подшипнике, начатые на предыдущем этапе работы. Цели исследования на данном этапе

- анализ проявления нестационарности вибросигналов подшипников без повреждений на длительных временных реализациях;
- анализ влияния форм колебаний подшипников на вибросигналы подшипников с повреждениями;
- дополнительная обработка экспериментальных данных для определения возможности оценки серьезности локальных повреждений подшипников по комбинированным дискриминантам вибросигналов.

В рамках настоящей работы выполнен третий этап исследования вибрации, вызываемой взаимодействием деталей шарикоподшипников с пограничными и развитыми локальными повреждениями. Объектами исследований, как и на предыдущих этапах [1 – 3], являются шариковые радиальные подшипники типа 75 – 205P2 ЕТУ100.

Основные результаты

В данной работе приводятся обобщенные результаты дополнительной обработки и анализа сигналов, полученных при экспериментах с измерением вибрации шариковых подшипников на универсальной технологической приводной установке КВП-1М. Для дополнительной обработки использованы сигналы акселерометров типа 4397А (вес 2,4 г, диаметр контактной поверхности 7,3 мм), закрепленных на подшипнике с помощью клея и ориентированных в радиальном направлении.

Рабочий диапазон частот измерительного канала: 5 Гц – 50 кГц. Измеряемый параметр: виброускорение.

Настройки программного обеспечения при записи сигнала:

– аналого-цифровое преобразование входного сигнала: частота дискретизации равна 50 000 Гц; число отсчетов составляет 50 002.

Обработка сигналов выполнена в ЦИАМ с помощью ПО Matlab 7. Длительность реализаций сигналов – 1 мин. Частотный диапазон сигналов 0...50 кГц.

Получены детальные спектры виброускорения в диапазоне частот 0...25 кГц. В спектрах информативным оказался диапазон частот 0...15 кГц.

Выполнен анализ сигналов четырех датчиков вибраций на каждом исследуемом подшипнике. Сигналы длительностью 1 мин одновременно зарегистрированы при частоте вращения привода 1800 об/мин, нагрузках $F_a = 75$ Н и $F_r = 0$ и следующих положениях датчиков вибрации на наружном кольце подшипника: 0° над номером, 90° от номера; 180° от номера; 270° от номера.

Также, приводятся результаты расчета собственных частот колебаний подшипника по методике ВНИИП и с помощью метода конечных элементов в трехмерной постановке.

Согласно результатам расчета, пик на частоте 6500 Гц, соответствует форме колебаний с одним узловым диаметром, а пик на частоте 12 000 Гц – форме колебаний с двумя узловыми диаметрами. Однако положение узловых диаметров на экспериментальной собственной форме колебаний подшипника установить не удалось. Неопределенному положению узловых диаметров способствует отсутствие неподвижной радиальной нагрузки.

Для более детального анализа вибрации подшипников предложено очистить спектр колебаний от дискретных гармонических составляющих. В настоящей работе для этой цели предложена фильтрация сигнала с помощью вейвлет-функции 8-го порядка. Использование вейвлет-фильтрации дает возможность исследовать и сравнить возбудимость различных собственных форм колебаний подшипников и найти коэффициенты модального демпфирования системы.

Заключение

1. Показано, что вибрация подшипников без повреждений может иметь характер кратковременных пачек (длительностью до нескольких десятков оборотов сепаратора) весьма сильных высокочастотных импульсов. Это подтверждено анализом длительных реализаций вибросигналов. Наличие таких импульсов может существенно затруднить вибродиагностику слабых локальных повреждений подшипников.

2. Формы колебаний подшипника оказывают значительное влияние на составляющие спектра вибрации. Это влияние форм колебаний подшипника проявляется следующим образом:

- в спектрах виброускорения исследованного подшипника без повреждений проявляются шумовые пики на частотах, соответствующих расчетным частотам собственных колебаний системы по 1 – 3 формам;

- колебания подшипника по форме с одним узловым диаметром возбуждаются сильнее, чем колебания по форме с двумя узловыми диаметрами;

- в спектрах виброускорения исследованного подшипника с пограничным повреждением на наружной дорожке в виде риски проявляются шумовые пики на частотах соответствующих собственным колебаниям системы по 1 – 3 формам;

- в случае подшипника с пограничным повреждением на наружной дорожке в виде риски положение датчика относительно места повреждения сильнее влияет на амплитуду пика на частоте формы с одним узловым диаметром;

- в случае исследованного подшипника с пограничным повреждением на наружной дорожке в виде риски, слабое влияние положения датчика на амплитуду пика на частоте формы с двумя узловыми диаметрами можно объяснить значительными размерами контактной площадки датчика по сравнению с наружным диаметром подшипника и смещением положения датчиков относительно предполагаемого положения диаметров с пучностями.

3. Показано, что для диагностики сильно развитых и пограничных локальных повреждений подшипника эффективно совместное использование трех дискриминант вибросигнала: пикового значения, эксцесса и среднеквадратичного значения.

4. Выявлено, что в случае пограничных локальных повреждений наружного кольца вибрация подшипника на частоте прокатывания шариков по наружной дорожке и ее гармониках может оказаться слабее вибрации подшипника без повреждений, что осложняет диагностику таких повреждений.

5. Показана полезность детального анализа модальных характеристик колебаний (собственных частот, коэффициентов модального демпфирования, компонентов собственных форм колебаний) на основе вейвлет-фильтрации вибросигналов для оценки состояния подшипников.

Литература

1. **Раздел 3.4.** Экспериментальные исследования вибрации неразборных подшипников с повреждениями с целью определения вибродиагностических параметров работоспособного состояния и повреждений подшипников, применяемых в опорах приводов агрегатов авиадвигателей. НИР «Здоровье». Технический отчет № ЦИАМ. 2013.

2. **Разработка** конструктивно-технологических решений и нормативного обеспечения для выполнения требований по надежности, безопасности полетов и эффективности эксплуатации перспективных и эксплуатирующихся авиационных двигателей. Глава 6.2. Экспериментальная обработка взаимодействия поврежденных деталей с целью создания методов вибродиагностики подшипников ГТД. НИР «Надежность ДГА». Технический отчет. ЦИАМ. 2012.

3. **Исследования** вибрации неразборных шарикоподшипников, применяемых в опорах приводов агрегатов авиадвигателей: Технический отчет № 14277. ЦИАМ. 2013.

4. **Авдеев А.М., Потрясаев И.В., Варламов Е.Б., Самохин О.Н., Бальмонт В.Б.** Моделирование и экспериментальное исследование вибрации шариковых подшипников: Труды НПО ВНИПП. 1988, вып. 2. С. 57 – 66.

5. **Разработка** конструктивно-технологических решений и нормативного обеспечения для выполнения требований по надежности, безопасности полетов и эффективности эксплуатации перспективных и эксплуатирующихся авиационных двигателей. Глава 1.11. Разработка математических моделей взаимодействия поврежденных деталей с целью создания методов вибродиагностики подшипников качения ГТД. НИР «Надежность ДГА». Технический отчет. ЦИАМ. 2011.

6. **Sassi S., Badri B., Thomas M.** Tracking Surface Degradation of Ball Bearings by Means of New Time Domain Scalar Descriptors, International Journal of COMADEM. 2008. Vol .11(3). P. 36 – 45.

УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ ПОВРЕЖДЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ЭНЕРГОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В РЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМАХ

Решетов А.А.

*ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород»,
г. Нижний Новгород, Россия*

Введение

По результатам анализа статистики отказов узлов энергомеханического оборудования известно, что выход их из строя в 80 % случаев обусловлен повреждением и/или разрушением подшипников. Поэтому в области

вибромониторинга технического состояния энергомеханического оборудования широко используются методы, средства и стандарты, основанные на контроле и анализе изгибных и продольных колебаний валопроводов (которые передаются на опорные узлы).

Кроме того, в настоящее время часть наиболее опасных отказов энергомеханического оборудования происходит по причинам повреждения основных узлов кинематической структуры валопровода, несущих технологическую нагрузку (муфт, валов, лопаток и других) (до 20 % случаев отказов – из-за механических причин, связанных с крутильными колебаниями). Они влекут за собой расходы по простоям агрегатов и потери эксплуатационной прибыли, затраты на ремонт оборудования, замену самих поврежденных деталей. Однако контроль и анализ параметров угловой вибрации не предусмотрен и не осуществляется как мобильными средствами, так и штатными системами автоматического управления энергомеханического оборудования. Поэтому для решения данной проблемы появляется практическая потребность в разработке методов и средств повышения эффективности вибромониторинга технического состояния энергомеханического оборудования путем учета крутильных колебаний валопровода (и скручивающих усилий на его участках).

Работа посвящена совершенствованию технологии вибромониторинга технического состояния энергомеханического оборудования, в том числе газотранспортных систем. Параметры энергетических форм, спектров кинетических и потенциальных энергий (определяемые с помощью компьютерных методов и средств) предложено использовать как априорную информацию о ранжировании рисков повреждения узлов энергомеханического оборудования [1 – 3].

Основные результаты

Необходимым предварительным этапом работ по повышению эффективности вибромониторинга технического состояния энергомеханического оборудования является разработка методов и средств определения узлов его конструкции, чувствительных к зарождению дефектов и оценка возможных путей диагностирования. В этих целях применены методы компьютерного моделирования как экономически целесообразные и разработаны расчетно-экспериментальные методы и соответствующие программно-алгоритмические средства:

- метод тестового контроля параметров колебаний объекта по энергетическим формам для анализа собственных (свободных) колебаний системы;
- метод вибродиагностического контроля энергомеханического оборудования на основе показателей чувствительности узлов к возбуждающим колебаниям воздействиям.

В отличие от существующих методов вибромониторинга технического состояния, ориентированных на использование абсолютных значений энергетических параметров виброскорости корпусов подшипников или корпусов энергомеханического оборудования в низкочастотном диапазоне его оборотных частот (являющихся источниками вторичной информации о наличии развитых дефектов типа обрыва лопатки, задевания ротора о статор, разрушения подшипника и т.п.), предлагаемые методы и средства основаны на применении расчетных спектральных портретов (параметров энергетических форм и спектров) угловой вибрации объекта диагностирования (на основе показателей чувствительности элементов системы к возбуждающим колебаниям воздействиям) в широком диапазоне частот, существенно облегчающих прогнозирование зарождающихся дефектов по структуре изделия, позволяющих ранжировать риски повреждения деталей энергомеханического оборудования в резонансных режимах, выявить истинную неисправность на ранней стадии и проследить за ее развитием до критического состояния. Для вынесения заключения об отсутствии или наличии дефекта, а также его развитии необходимо сравнить расчетную априорную информацию (расчетный спектральный портрет, определяемый по компьютерной программе) с апостериорным спектральным портретом на основе виброакустического канала.

В теории колебаний и практике диагностирования наибольшее распространение нашло применение параметров (пучностей и узлов) обычных форм собственных колебаний валопроводов энергомеханического оборудования. Однако, в практических задачах тестового (штатного) вибродиагностического контроля оборудования и отстройки структурно-сложных систем от резонансных режимов в качестве параметров описания диагностических признаков (собственных частот) целесообразно использовать параметры энергетической формы колебаний (уровни энергоемкостей элементов), так как эффективность анализа и отстройки собственных колебаний значительно зависит от частоты возбуждения, точки и направления приложения возбуждения к объекту диагностирования.

Обсуждение результатов

Определяющим фактором образования дефектов в основных узлах энергомеханического оборудования (отклика системы на зарождение дефекта) является качество отстройки валопровода от возбуждения резонансов крутильных колебаний, с учетом значения и продолжительности возбуждения, уровней демпфирования и показателей чувствительности элементов конструкции к возбуждающим колебаниям воздействиям. Таким образом, любое оборудование обладает врожденными динамическими параметрами и структурой, зависящими от конструктивных особенностей. При этом соотношения энергий (кинетических и потенциальных) собствен-

ных колебаний пропорциональны относительно изменению собственных частот, что позволяет ввести новые параметры описания диагностических признаков (собственных частот) – энергетические формы и спектры. Угловые координаты (перемещения) и силы (инерции, упругости) такой возможностью не обладают. Также следует еще учесть то, что размерности координат (перемещений) элементов и сил элементов могут быть разными и их сравнивать нельзя (например, сравнивать силу и момент пары сил упругости нельзя), а энергии всех элементов имеют одну размерность. Поэтому построение энергетических форм и спектров позволяет сравнивать характеристики энергоемких элементов.

Результаты по совокупности расчетов позволили уточнить априорную информацию о рисках резонансных режимов валопроводной системы газоперекачивающих агрегатов газотранспортных систем при возбуждении заметных крутильных колебаний электрическим и газодинамическим моментами. Так, например, широко распространенный подход, основанный на применении параметров обычных форм собственных крутильных колебаний валопроводов, может быть оправдан только при анализе изменения угловых координат (перемещений) от крутильных колебаний.

Для повышения эффективности расчетно-экспериментального анализа изменения виброактивности элементов системы по их угловым скоростям следует обратиться к априорной информации на основе параметров энергетических форм (энергоемких элементов). Расчетное исследование собственных крутильных колебаний валопровода энергомеханического оборудования газотранспортных систем (определение собственных частот, энергетических форм, энергетических спектров) необходимо выполнять также в целях обоснования выбора мест установки вибропреобразователей по структуре объекта диагностирования, повышения чувствительности компонентов угловой вибрации валопровода к изменению его технического состояния (повышения эффективности измерения крутильных колебаний), оценки близости собственных частот к частотам возбуждающих воздействий (со стороны привода, потребителя энергии – нагнетателя природного газа, дефектов эксплуатационного и конструктивно-монтажного характера).

При этом уровень до которого детали оборудования на частотах собственных колебаний чувствительны к возбуждению, значительно различается. Уровень чувствительности классифицируется от *легко возбуждаемого* до *не возбуждаемого*. Но элементы оборудования, которые не возбуждаются даже при точном резонансе и очень слабом демпфировании не представляют какой-либо риск по отношению к возможным дефектам и повреждениям оборудования в процессе эксплуатации. Поэтому, такие резонансные режимы могут быть игнорированы, что повышает эффективность процесса создания оптимальных конструкций, поиска врожденных и зарождающихся конструктивно-монтажных дефектов оборудования. Становится возможным эффективное управление спектром собственных колебаний

структурно-сложных систем, что равносильно управлению рисками повреждения деталей и узлов в резонансных режимах (надежностью и безопасностью) энергомеханического оборудования.

Литература

1. **Неразрушающий** контроль: справочник. В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2003 – 2005.
2. **Решетов А.А.** Неразрушающий контроль и техническая диагностика энергетических объектов: учебное пособие / А.А. Решетов, А.К. Аракелян; под ред. проф. А.К. Аракеяна. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2010. 470 с.
3. **Решетов А.А.** Повышение эффективности вибродиагностического контроля энергомеханического оборудования опасных производственных объектов // Безопасность труда в промышленности. 2013. № 10. С. 55 – 62.

КРИСТАЛЛЫ ЛГТ И КТГС ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ

Сахаров С.А., Бузанов О.А., Забелин А.Н., Аленков В.В.
ОАО «Фомос-Материалс», Москва, Россия

Пьезоэлектрические кристаллы из семейства материалов, изоморфных галлогерманату кальция $\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_4\text{O}_{14}$, принадлежащие к классу симметрии 32 (т.е. к тому же классу, что и кварц), представляют большой интерес для современной пьезотехники. Известным представителем этого семейства является лантан-галлиевый силикат ($\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$, лангасит), впервые синтезированный и изученный в России в 80-х гг. XX в.

Последующие усилия, направленные на улучшение электромеханических и упругих свойств кристаллов, привели к появлению более упорядоченных материалов типа $\text{La}_3\text{Ga}_{5,5}\text{Nb}_{0,5}\text{O}_{14}$ (ланганит) и $\text{La}_3\text{Ga}_{5,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_{14}$ (лангатат), а сравнительно недавно – и нового семейства кристаллов в составе $\text{Sr}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ (SNGS), $\text{Ca}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ (CNGS), $\text{Ca}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ (CTGS) и $\text{Sr}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ (STGS), обладающих, как ожидается, улучшенными по сравнению с лангаситом характеристиками [1]. Следует отметить принципиальную возможность всех перечисленных выше кристаллов сохранять свои пьезоэлектрические свойства вплоть до очень высоких температур (более 1000 °С). Эти кристаллы интенсивно исследуются в настоящее время [2 – 4]. Электрическое сопротивление кристаллов CTGS выше по сравнению с неупорядоченными кристаллами семейства лангасита. Кристаллы CTGS имеют наилучшую температурную стабильность пьезоэлектрических свойств [5]. Кристаллы CTGS демонстрируют низкую температурную зависимость диэлектрических и электромеханических свойств при температу-

рах до 800 °С, что является необходимым условием для применения материала в высокотемпературных пьезоэлектрических сенсорах.

Анализ литературных данных показывает, что на сегодняшний день процесс выращивания упорядоченных монокристаллов семейства лангасита активно исследуется различными лабораториями, в том числе – в России, Японии и США. Однако получение кристаллов высокого качества и больших диаметров по-прежнему представляет собой серьезную проблему. В большинстве литературных источников получение монокристаллов носит исследовательский характер и не направлено на промышленное производство.

ОАО «Фомос-Материалс» разработана технология выращивания высококачественных монокристаллов лангасита и СТГС по методу Чохральского, позволяющая получать монокристаллы диаметром 80 мм и длиной до 100 мм.

Литература

1. **A new class** of Ordered Langasite Structure Compounds / В.Н.Т. Chai, А.Н.Р. Bustamante, М.С. Chout // Proc. IEEE Int. Freq. Control. Symp. 2000. P. 163.
2. **Сотников А.В., Kunze R., Schmidt H., Weihnacht M., Hengst M., Götze J.** Пьезоэлектрические и упругие свойства монокристаллов $Sr_3NbGa_3Si_2O_{14}$ (SNGS) // ФТТ. 2009. Т. 51, № 2. С. 261 – 264.
3. **Piezoelectric** Properties of $Ca_3NbGa_3Si_2O_{14}$ Single Crystal / Т. Karaki, R. Sato, M. Adachi, J.-I. Kushibiki, M. Arakawa // Jpn. J. Appl. Phys. 2004. V. 43. P. 6721.
4. **Crystal** Growth and Dielectric, Piezoelectric and Elastic Properties of $Ca_3TaGa_3Si_2O_{14}$ Single Crystal / X. Chi, D. Yuan, X. Yin, A. Wei, S. Guo, F. Yu // Solid State Commun. 2007. V. 142. P. 173.
5. **Characterization** of High Temperature Piezoelectric Crystals with an Ordered Langasite Structure / S. Zhang, Y. Zheng, H. Kong, J. Xin, E. Frantz, T.R. Shrout // J. Appl. Phys. 2009. V. 105. 114107.

ДООСНАЩЕНИЕ СИСТЕМАМИ ДИАГНОСТИКИ

Соколов Д.В.¹, Мынцов А.А.¹, Кореев А.А.²
¹ЗАО «Промсервис», ²ООО «Томскнефтехим»

Традиционно, в мировой практике, на мощных, дорогостоящих агрегатах в подшипниках скольжения, устанавливаются стационарные системы мониторинга и защиты оборудования, основанные на измерениях и анализе параметров относительной вибрации, с использованием токовихревых датчиков проксиметров.

В мировой практике, наибольшее распространение получила система Bently Nevada 3500, которая позволяет вести мониторинг вибрационных, технологических и термодинамических параметров агрегата. Данная система может комплектоваться программным обеспечением System 1 с системой автоматизированной диагностики Decision Support Studio – RuleDesk™ Pro, но в виду значительной стоимости данного ПО, на российский рынок, система 3500 поставляется как правило, без средств мониторинга и диагностики, т.е. только с возможностью индикации текущих значений контролируемых параметров, что в значительной степени ограничивает эффективность ее применения.

ЗАО «Промсервис» разработало и внедряет в промышленности систему «САДКО», которая при значительно меньшей стоимости обеспечивает все основные возможности System 1, а также обеспечивает дополнительные функции математической обработки, средства визуализации и автоматической диагностики.

В докладе описан опыт эксплуатации «САДКО» на примере системы, установленной на турбокомпрессорах установки 402К компримирования пирогаза Производства Мономеров ООО «Томскнефтехим».

В течение двухлетнего периода эксплуатации в режиме автоматического диагностирования были выявлены следующие значимые дефекты:

- Расцентровка турбины и ЦНД турбокомпрессора М1.
- Предпомпажное состояние в ЦСД турбокомпрессора М1, вследствие загрязнения теплообменника.
- Задевания за уплотнения в ЦВД турбокомпрессора М5.

В процессе автоматического диагностирования, распознавание дефектов осуществляется на основе анализа:

- Спектров виброперемещения, виброскорости, виброускорения в частотном диапазоне до 10 кГц.
- Полных спектров в частотном диапазоне до 5 кГц (полные спектры рассчитывается по траекториям движения ротора в подшипнике).
- Уровня постоянных составляющих сигналов датчиков проксиметров (это требуется для определения разницы постоянных составляющих сигналов в рабочем режиме и в момент останова агрегата, для оценки направления всплытия оси симметрии ротора на масляном клине в рабочем режиме).
- Фазовых характеристик вибрации на оборотной частоте.
- Трендов контролируемых параметров.

SQL сервер системы обеспечивает выдачу информации в компьютерную сеть. OPC сервер обеспечивает интеграцию в SCADA системы существующих АСУТП.

В рамках системы, через локальную сеть или Интернет, возможно создание удаленных рабочих мест специалистов и руководителей разного уровня. Доступ к функциям управления и регулирования работы системы авторизован при помощи системы учетных записей.

ОСОБЕННОСТИ БАЛАНСИРОВКИ РОТОРОВ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ В СОБСТВЕННЫХ ОПОРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИХРЕТОКОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Старых М.Н., Подвальный А.М.
ООО «ТД «Технекон», Москва, Россия

Балансировка роторов центробежных компрессоров (ЦБК) в собственных опорах непосредственно в составе валопровода имеет ряд преимуществ, среди которых основными являются:

- 1) точность балансировки;
- 2) учет суммарных остаточных дисбалансов валопровода в сборе;
- 3) учет аэродинамического дисбаланса при балансировке на рабочей частоте вращения;
- 4) устранение эксплуатационного дисбаланса на месте (отсутствие временных и материальных затрат, связанных с транспортировкой роторов для балансировки на специальные стенды ремонтных заводов).

Учитывая то, что в качестве измерительного оборудования для проведения балансировки предлагается использовать штатную вихретоковую измерительную систему контроля вибрации, становится очевидным экономическая выгода проведения данного типа балансировок.

Особенностью балансировки роторов ЦБК в собственных опорах с использованием вихретоковых измерительных систем в настоящее время является то, что подавляющее большинство находящихся в эксплуатации роторов имеют значительные уровни так называемой ложной вибрации, вызванной несовершенством измерительной поверхности. Про ложную вибрацию и способы ее устранения написано немного, но известно [1 – 4], что при использовании вихретоковых датчиков относительной вибрации на интенсивность и характер распределения вихревых токов, возбуждаемых на соответствующей измерительной поверхности, кроме рабочего зазора, существенное влияние на результаты измерений оказывают:

- 1) наличие на измерительной поверхности царапин, трещин, загрязнений (в том числе маслом и смазочными веществами);
- 2) кривизна, шероховатость измерительной поверхности;
- 3) толщина токопроводящего слоя, магнитная проницаемость, удельная электрическая проводимость материала измерительной поверхности.

Присутствие ложной вибрации при эксплуатировании ЦБК существенно завышает их истинные значения вибрации, что делает проблематичным не только их нормальную эксплуатацию на объекте, но и возможность их успешной балансировки в собственных опорах.

Для оценки преимуществ балансировки в собственных опорах при помощи штатной вихретоковой измерительной системы контроля вибрации

и оценки влияния несовершенства измерительной поверхности на непосредственно процесс балансировки авторами были проведены исследования на лабораторном стенде ООО «ТД «Технекон», а также проведена балансировка нагнетателя НЦ-6,3 в составе ГПА.

Результаты балансировки оценивались портативным виброанализатором STD-3300 ООО «ТД «Технекон» по установленным на опорах ротора акселерометрам.

При проведении лабораторных исследований для имитации несовершенства измерительной поверхности ротора при помощи механической обработки был искусственно создан дефект, в результате которого вибрация ротора на малых оборотах (при которых влияние остаточного дисбаланса пренебрежимо мало) составляла порядка 70...100 мкм.

При проведении балансировки по датчикам относительной вибрации ротора без учета дефектов измерительной поверхности вибрация опор ротора по показаниям акселерометров возрастала в несколько раз. При этом уровни вибрации по показаниям датчиков относительной вибрации ротора в полосе первой оборотной гармоники не превышали 5 мкм на выбранной частоте вращения.

При балансировке с учетом несовершенства измерительной поверхности было зафиксировано существенное снижение вибрации как по показаниям датчиков относительной вибрации ротора, так и по акселерометрам, установленным на опорах ротора.

Такие исследования подчеркнули необходимость учета несовершенства измерительной поверхности во время балансировки.

В реальных условиях несовершенство (дефекты) измерительной поверхности, как правило, носит эксплуатационный характер и является следствием того, что состоянию измерительной поверхности в процессе эксплуатации не уделяют должного внимания. Например, при проведении ремонтов, сопровождающихся демонтажем ротора, измерительные поверхности могут являться технологическими и использоваться непосредственно для осуществления процесса демонтажирования ротора. Повреждения измерительной поверхности при таком подходе могут являться совершенно незначительными при визуальном осмотре и контроле поверхности при помощи индикатора часового типа. Однако иная картина возникает при использовании системы измерения относительной вибрации ротора при помощи вихретоковых датчиков. В некоторых случаях уровни вибрации в контрольной полосе «размах виброперемещения в полосе 10...1000 Гц» могут достигать предупредительных значений уставок уже на малых оборотах, при которых действительная вибрация ротора (вследствие наличия остаточного дисбаланса) пренебрежимо мала.

Приведенная выше особенность измерения вибрации была применена при проведении балансировки в натуральных условиях (на объекте) при балансировке нагнетателя НЦ-6,3. При анализе вибрационного состояния ротора нагнетателя были обнаружены и определены уровни ложной вибрации.

Экспериментальная финишная балансировка в собственных опорах проводилась с учетом определенных уровней ложной вибрации на частоте 4600...4800 об/мин. В качестве корректировочных плоскостей использовались плоскости муфт, расположенных на концах ротора нагнетателя. В результате балансировки более чем в 3 раза снижена вибрация ротора по установленным в вертикальном направлении датчикам относительной вибрации. Вибрация опор ротора нагнетателя по датчикам абсолютной вибрации снизилась более чем в 1,5 раза.

Балансировка роторов ЦБК в собственных опорах с использованием штатных вихретоковых измерительных систем может успешно применяться на объектах при балансировке на рабочих частотах вращения.

Литература

1. **Зусман Г.В., Барков А.В.** Вибродиагностика: учебное пособие / под общ. ред. В.В. Ключева. М.: Издательский дом «Спектр», 2011. 215 с.
2. **ГОСТ Р ИСО 15549–2009.** Контроль неразрушающий. Контроль вихретоковый. Основные положения. М.: Стандартиформ, 2011. 12 с.
3. **Зименков В.А., И.Н. Урманцев, А.Н. Зайцев** и др. Мифы и реальность вибрационного состояния роторов нагнетателей, контролируемых штатными системами виброперемещения // Газотурбинные технологии. 2011. № 6. С. 14 – 18.
4. **Ефимов А.Г.** Разработка адаптивных вихретоковых средств дефектоскопии: дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. 157 с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ПОВРЕЖДЕНИЙ НАРУЖНОГО КОЛЬЦА И ТЕЛ КАЧЕНИЯ ПОДШИПНИКА

Шорр Б.Ф., Иванов И.И., Карасев В.А., Назаренко Г.М., Петров Н.И.
ЦИАМ им. Баранова, Москва, Россия

Целью работы является разработка и исследование перспективных методов вибродиагностики состояния подшипников роторов двигателя, базирующихся на измерении вибрации непосредственно на подшипнике (на кольцах или сепараторе) или вблизи него на опоре.

Диагностическими признаками дефектов и повреждений служат не только изменение абсолютного уровня колебаний, но появление в вибрационном спектре новых составляющих. Поиск диагностических признаков только экспериментальным путем очень трудоемок и не всегда продуктивен. Его целесообразно дополнять математическим моделированием динамических воздействий на детали подшипникового узла при исправных и поврежденных элементах.

В данной работе моделируются динамические отклики на возможные повреждения наружного кольца и тел качения подшипника. Предполагается, что источником сигналов является радиальная нагрузка на внутреннюю дорожку наружного кольца от давления катящихся по кольцу тел качения, которая описывается сосредоточенными силами.

Нестационарные деформации и перемещения кольца (отклик системы) рассчитываются как переходный (транзиентный) процесс по 2D конечно-элементной модели в программном пакете MSC NASTRAN.

В качестве отклика системы рассматривались регистрируемые приемниками следующие сигналы:

а) окружная деформация в некоторой точке на внешней поверхности кольца;

б) радиальное перемещение некоторой точки на внешней поверхности кольца.

Проведенные математические исследования позволили выявить отличия характерных откликов подшипников с различными типами повреждений от отклика неповрежденного подшипника.

СЕКЦИЯ 9. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ

Руководители секции: Иванов В.И., Муравьев В.В.

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Аугутис В., Ваштакас Э.

Каунасский технологический университет, г. Каунас, Литва

Известны методы, в том числе и стандартизованные, измерения частотных характеристик преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ) [1, 2]. Результатом измерения обычно является логарифмическая частотная характеристика. Тем не менее, она не полностью отражает свойства ПАЭ. Нами предлагается измерять и импульсную характеристику, которая актуальна с точки зрения счета импульсов АЭ. Для этой цели нами разработаны и исследованы два типа установок.

Первый тип основан на синтезе стандартного воздействия на ПАЭ вдоль его оси. Для этого используется смещение торца стержня, возбуждаемого в другом конце сигналом, учитывающим дисперсионные свойства стержня.

Второй тип основан на воздействии чувствительной поверхности ПАЭ волной Лэмба в пластине поперек оси ПАЭ.

Используя оба типа воздействия получаем более полную картину об пространственно-временных и частотных свойствах ПАЭ.

На рисунках 1, 2 показаны временные, а на рис. 3 – пространственная форма сигнала воздействия.

Примеры характеристик ПАЭ приведены на рис. 4, 5.

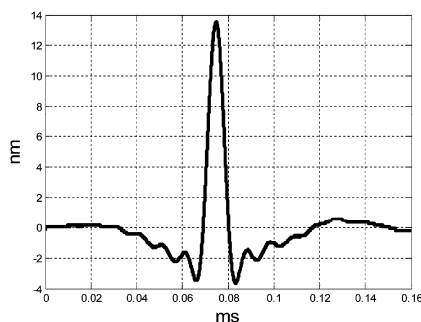


Рис. 1. Форма смещения торца стержня

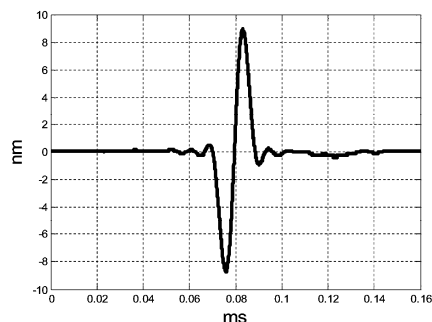


Рис. 2. Форма смещения поверхности пластины

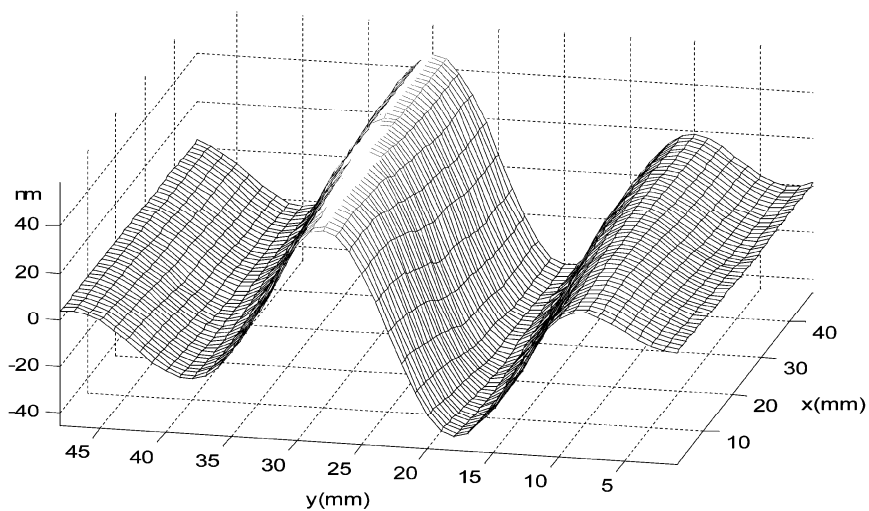
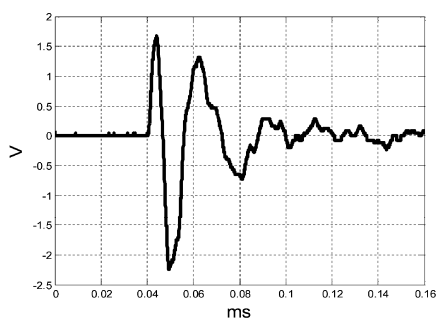
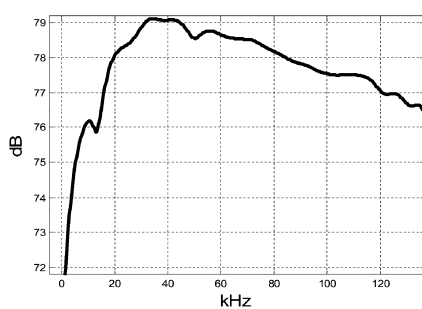


Рис. 3. Форма волны на поверхности пластины



**Рис. 4. Импульсная характеристика
низкочастотного ПАЭ**



**Рис. 5. Частотная характеристика
низкочастотного ПАЭ**

Литература

1. **ISO 12713:1998(E)**. Non-destructive Testing – Acoustic Emission Inspection – Primary Calibration of Transducers.
2. **ASTM: E976-99**. Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensors Response.

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ НА СОДЕРЖАНИЕ ВОДОРОДА В ПОВЕРХНОСТНОМ ДЕФЕКТНОМ СЛОЕ

Бахматов П.В., Муравьев В.И., Лончаков С.З., Плетнев Н.О., Пицык В.С.
*ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический
университет», г. Комсомольск-на-Амуре, Россия*

Данная работа посвящена определению влияния на адсорбционную способность загрязнений, как в аспекте интенсивности, так и экстенсивности на каждый вид поверхности, образованной различными физико-химическими и механическими методами обработки (I – разрушением, II – травлением, III – плавлением).

Спектральный анализ водорода в титане выделяются среди известных методов контроля качества экспрессностью, удовлетворительной воспроизводимостью, и возможностью точечного определения без разрушения образца, и его концентрационного распределения по глубине.

Каждый вид сформированной поверхности по-разному влияет на образование поверхностного дефектного слоя и в связи с этим на адсорбцию влаги и в конечном счете на содержание водорода в поверхностном слое.

Исходя из высокой химической активности титана и его сплавов, следует ожидать развития на их поверхности как процесса физической адсорбции, так и последующего процесса хемосорбции. Шероховатость поверхности значительно увеличивает адсорбирующую способность, как в аспекте интенсивности, так и экстенсивности.

Помимо адсорбционного процесса веществ, во множестве капиллярных углублений и полостей шероховатой поверхности может протекать процесс капиллярной конденсации влаги. Вероятность капиллярной конденсации влаги увеличивается с уменьшением температуры конденсации, и она особенно велика при переносе охлажденных деталей в теплую среду.

Как видно из данных табл. 1 формирование поверхностного слоя образцов определяется операциями технологического цикла их изготовления. При этом формируется определенный, свойственный каждому методу обработки, макро-, микро-, субмикрорельеф обработанной поверхности, характеризующихся стандартными параметрами поверхности. Основными являются высотные характеристики и среди них наиболее предпочтителен параметр Ra , так как для его определения используется большое число точек реального профиля.

Как видно из данных рис. 1, дефектность поверхностного слоя образцов оказывает существенное влияние на содержание водорода в поверхностном слое. Содержание легирующих элементов также оказывает существенное влияние на поверхностное содержание водорода.

1. Шероховатость поверхности и глубины разрыхленного слоя образцов после различных видов обработки

№	Вид обработки	Глубина разрыхленного слоя H_m , мкр	Параметр шероховатости Ra , мкм	Глубина дефектного слоя h , мм
1	Полирование	0,15	0,1	0,01
2	Чистовое шлифование	1,0	0,8	0,03
3	Шабрение	3,0	1,25	0,3
4	Чистовое фрезерование	6,0	3,2	0,5
5	Грубое фрезерование	8,0	6,3	0,8
6	Рубка на ножницах гильотинного типа	15	320 (Rz)	1...3
7	Ультразвуковая пластическая деформация	0	<0,05	0
8	Травление	0,03	0,4	
9	Электроэрозионная обработка	0,025	0,1	0,01...0,06
10	Электронно-лучевое оплавление	0	1,25	0
11	Газолазерная резка в азоте	0	3,2	0,5
12	Газолазерная резка в аргоне	0	2,5	0,3
13	Гидроабразивная резка	0	3,8	0,1
14	Плазменная резка в азоте	0	6,3	0,5
15	Газопламенная резка	0	>320 (Rz)	3...5

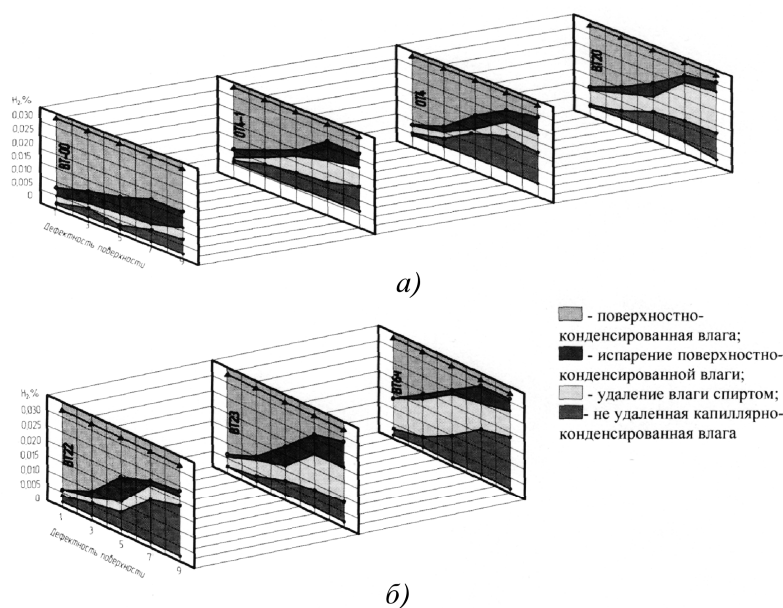


Рис. 1. Изменение содержания водорода в поверхностном слое заготовок из различных титановых сплавов в зависимости от дефектности, вызванной различными методами обработки

Чем дефектнее поверхность заготовки, тем медленнее испарение конденсированной влаги с поверхности, тем больше содержание водорода в поверхностном слое. Эта закономерность наблюдается для всех марок титановых сплавов, особенно после внесения холодных образцов в тепло и выдержки при комнатной температуре (рис. 1).

Обезвоживание поверхности образцов спиртом позволяет полностью удалить поверхностно конденсированную влагу только для бездефектных образцов, у которых содержание водорода с поверхности при этом становится одинаково с содержанием водорода в металле. Разница в содержании водорода с поверхности и в сердцевине увеличивается с увеличением дефектности поверхностного слоя (рис. 1).

Учитывая [1], что удаление капиллярно-конденсированной влаги с дефектной поверхности представляет определенные сложности, то с достаточной степенью точности можно утверждать, что разница в значениях содержания водорода в основном металле и в поверхностном слое объясняется наличием капиллярно-конденсированной влаги в дефектном слое, причем, чем дефектность слоя выше, тем больше в нем содержание водорода (рис. 1).

Основные выводы

1. Сформированная поверхность макро-, микрорельефа и глубина подповерхностного микро-, субмикродфектного слоя при изготовлении заготовок по разному адсорбируют влагу.

2. Спектральный анализ содержания водорода на поверхности заготовок из титановых сплавов позволяет качественно оценить количество адсорбированной влаги и вид ее адсорбции: поверхностная или капиллярно-конденсированная.

3. Внесение холодных заготовок в тепло приводит к интенсивной адсорбции влаги и максимальному содержанию водорода в поверхностном слое независимо от вида формирования поверхности раздела.

4. Процессы формирования структуры поверхности заготовок вызванные разрушением (механическое воздействие, механическая обработка) и травление (химическое, электроэрозионная и др.) могут не различаться по параметрам шероховатости, но существенно отличаться глубиной микро-, субмикродфектного слоя (разрыхления, избирательное растравливание и др.) и поэтому, видом и количеством адсорбированной влаги и содержанием водорода в поверхностном слое. Максимальное содержание водорода наблюдается у образцов, раскrojенных на ножницах гильотинного типа.

5. Содержание водорода в поверхностном слое образцов образованных процессами плавнения (электронно-лучевое оплавление, ГЛР в аргоне, ГЛР в азоте) практически остается на уровне содержания водорода в основном металле, исключение составляет плазменный и газопламенный раскрой.

Литература

1. Ханьжин П.С., Яблоник Л.М. Влияние технологии контроля на выявление дефектов капиллярным методом // Дефектоскопия. 1980. № 6. С. 64 – 71.

2. Муравьев В.И. Особенности изготовления и оценка качества крупногабаритных тонкостенных сварных конструкций из сплава ВТ20 // Авиационная промышленность. 1986. № 8. С. 15 – 18.

3. Муравьев В.И. Проблемы порообразования в сварных швах титановых сплавов / В.И. Муравьев // Материаловедение и термическая обработка металлов. 2005. № 7. С. 30 – 37.

4. Муравьев В.И. Активация и дезактивация конденсации загрязнений на поверхности свариваемых заготовок из титановых сплавов / В.И. Муравьев, П.В. Бахматов, С.З. Лончаков, О.П. Логвинов // Контроль. Диагностика. 2012. № 3. С. 26 – 30.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТЕРИЕВ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

Башков О.В.¹, Панин С.В.^{2,3}, Бяков А.В.², Попкова А.А.¹

¹ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный
технический университет»,

г. Комсомольск-на-Амуре, Россия;

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
г. Томск, Россия;

³Национальный исследовательский Томский политехнический
университет, г. Томск, Россия

Большинство изделий и конструкций машиностроения эксплуатируется в условиях действия статических и циклических нагрузок. Свойства материалов, ответственные за прочность, долговечность и надежность конструкций, определяются не только статическим состоянием их структуры, но и способностью динамических приспособляться к внешним воздействиям. В процессе воздействия эксплуатационных нагрузок материалы испытывают постоянное динамическое изменение структуры. Это приводит к тому, что не всегда статическое структурное состояние материала отражает техническое состояние конструкции. В исследовании динамики изменения показателей свойств важно располагать информацией о кинетике структурных изменений в материалах. Существует не много методов, позволяющих исследовать кинетику структурных изменений в материалах. Метод акустической эмиссии (АЭ) является одним из них. Деформация материала является сложным многоуровневым многостадийным процессом, включающим различные механизмы пластического деформирования и разрушения [1, 2].

Акустическая эмиссия (АЭ) при деформации и разрушении материалов содержит значительный объем важной информации о физических процессах, изменениях структуры материала, а также о механизмах, энергии разрушения, скорости деформации и т.д. В литературе встречаются работы, посвященные анализу не только совокупности сигналов АЭ при испытании материалов, но и анализу единичных сигналов АЭ с целью их детальной расшифровки и идентификации [3 – 6]. Сложность параметрического описания распространения акустических волн в ограниченной анизотропной среде пока не позволяет разработать единую теорию идентификации сигналов и источников АЭ. Получение новых результатов исследований взаимосвязи сигналов АЭ с механизмами структурных изменений в материалах может стать одной из важных исследовательских практических задач современного материаловедения.

В работе представлены результаты исследований стадийности деформации и разрушения металлических материалов с использованием метода АЭ [8]. Авторами разработана методика идентификации источников АЭ, позволившая определять стадии структурных изменений в реальных условиях эксплуатации [9].

Методика основана на частотно-энергетическом анализе сигналов АЭ. Сигналы АЭ априори являются стохастическими. Для классификации источников АЭ были проведены исследования металлов и сплавов в различном структурном состоянии и в условиях различных видов нагружения. АЭ при генерации и движении дислокаций регистрировалась на стадиях легкого скольжения и деформационного упрочнения. Регистрируемые во время легкого скольжения сигналы АЭ всегда имеют высокочастотный передний фронт и достаточно быстро затухают. Амплитуда и энергия излучаемых сигналов минимальны. Сигналы АЭ, качественно характеризуемые как сигналы дислокационного типа, регистрировались также при проявлении чисто дислокационных эффектов в процессе деформации сплавов: эффекта прерывистой текучести Портевена Ле Шателье в сплаве АМг6АМ и преимущественно легком скольжении. Макротрещины излучают сигналы АЭ акселерационного типа, то есть имеют нарастающий фронт, что говорит о динамическом развитии процесса образования трещины: трещина не появляется мгновенно. Фронт сигнала имеет увеличивающиеся по амплитуде осцилляции. После достижения максимума следует снижение амплитуды осцилляций по релаксационному типу (затухающая во времени амплитуда осцилляций).

Для анализа частотных параметров АЭ сигналов был применен вейвлет-анализ. Количественная оценка спектральных составляющих сигналов АЭ по вейвлет-коэффициентам представляется не совсем удобной и не достаточно наглядной. Для повышения информативности был разработан количественный параметр, названный частотным коэффициентом K_f . Физический смысл частотного коэффициента K_f определяется как вклад частотных компонент спектра вейвлет-разложения в сигнал АЭ в целом:

$$stdFQ_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ji} - \bar{x}_j)^2},$$

где $stdFQ_j$ – среднее квадратическое отклонение j -го коэффициента вейвлет-разложения сигнала АЭ; n – число отсчетов дискретизации сигнала АЭ; x_{ji} – численное значение i -го отсчета j -го вейвлет-коэффициента; \bar{x}_j – среднее значение ряда из n отсчетов j -го вейвлет-коэффициента.

На плоскости двухпараметрического распределения $E - K_f$ сигналов АЭ при деформации и разрушении металлических материалов были выделены области, соответствующие различным типам источников. Распреде-

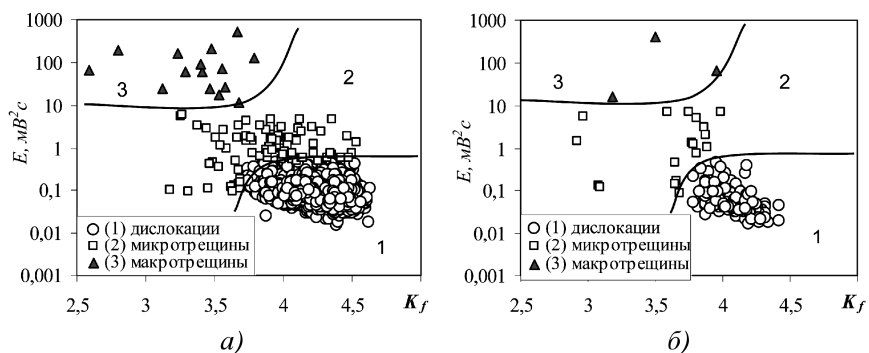


Рис. 1. Плоскости двухпараметрического распределения $E - Kf$ сигналов АЭ при деформации растяжением образцов:
a – сплав Д16АТ; *б* – сталь 20

ления $E - Kf$ по результатам исследований на растяжение образцов сплава Д16АТ и стали 20 представлены на рис. 1. Область 1 соответствует сигналам дислокационного типа, излучаемым во время активной генерации дислокаций, в области 2 распределены сигналы АЭ, излучаемые при образовании микротрещин и микронесплошностей, как правило, не превышающих 1 мкм. Образование и развитие макротрещин, имеющих значение линейного приращения $> 2 \dots 5$ мкм, сопровождается излучением АЭ сигналов распределенных в области 3.

Разработанная методика позволила провести исследования, выделить стадии на различных этапах и масштабных уровнях деформации в условиях статического и циклического деформирования. Методика может быть успешно применена в условиях испытаний и эксплуатации реальных объектов. Существующие на настоящий момент критерии оценки повреждений, приведенные в нормативной литературе, не всегда приемлемы для различных видов объектов и условий их использования. Идентификация источников АЭ может способствовать установлению действующих в конструкциях и эксплуатируемых объектах механизмов накопления повреждений. Проводимые исследования позволят осуществлять эффективное определение текущего состояния и прогнозирование остаточного ресурса ответственных объектов.

Литература

1. **Физическая** мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / Под ред. В.Е. Панина. Новосибирск: Наука, 1995. Т. 1. 298 с.; Т. 2. 320 с.
2. **Панин В.Е.** Основы физической мезомеханики // Физическая мезомеханика. 1998. Т. 1. № 1. С. 2 – 22.

3. **Муравин Г.Б., Симкин Я.В., Мерман А.И.** Идентификация механизма разрушения материалов методами спектрального анализа сигналов акустической эмиссии // Дефектоскопия. 1989. № 4. С. 9 – 15.
4. **Брагинский А.П.** Распознавание дефектов по спектральным характеристикам акустической эмиссии // Дефектоскопия. 1984. № 1. С. 47 – 55.
5. **Лысак Н.В., Скальский В.Р., Сергиенко О.Н.** О методологии АЭ-диагностирования трещинообразования // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 1991. № 3. С. 9 – 14.
6. **Hamstad M.A., Gallagher A.O. and Gary J.** Examination of the Application of a Wavelet Transform to Acoustic Emission Signals: Part 1. Source Identification // J. Acoustic Emission. 2002. V. 20. P. 39 – 61.
7. **Семашко Н.А., Башков О.В., Башкова Т.И.** Влияние степени деформации на эволюцию дефектности структуры титанового сплава ОТ4 // Перспективные материалы. 2000. № 1. С. 25 – 29.
8. **Панин С.В., Башков О.В., Семашко Н.А., Панин В.Е., Золотарева С.В.** Комбинированное исследование особенностей деформации плоских образцов и образцов с надрезом на микро- и мезоуровнях методами акустической эмиссии и построения карт деформации поверхности // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. Спец. вып. Ч. 2. С. 303 – 306.
9. **Башков О.В., Панин С.В., Семашко Н.А., Петров В.В., Шпак Д.А.** Идентификация источников акустической эмиссии при деформации и разрушении стали 12Х18Н10Т // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. № 10. С. 51 – 57.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ОБОБЩЕННОЙ ДИАГРАММЫ УСТАЛОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Башков О.В., Попкова А.А., Башкова Т.И.
ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет», г. Комсомольск-на-Амуре, Россия

Большинство изделий и конструкций машиностроения эксплуатируется в условиях действия циклических напряжений. Характеристики материалов, влияющие на долговечность конструкций, как правило, определяются их структурой и способностью сопротивляться знакопеременному воздействию внешних нагрузок. Одной из важных задач при эксплуатации изделий является возможность прогнозирования долговечности и, при необходимости, контроль возможного безопасного разрушения конструкций.

В работах В.С. Ивановой и В.Ф. Терентьева [1, 2] рассмотрена периодичность и стадийность процесса усталостного разрушения металлических материалов. На основании исследований механических свойств и фрактографического анализа, процесс усталостного разрушения был разделен на

несколько стадий: I – циклической микротекучести, II – циклической текучести, III – циклического упрочнения, IV – развития субмикротрещин до размеров микротрещин, V – развития микротрещин до размеров макротрещин, VI – долом. Стадии были названы по аналогии со статическим деформированием.

В работе представлены результаты исследований стадийности усталостного разрушения сталей, титановых и алюминиевых сплавов методом акустической эмиссии (АЭ). Стадии усталости при испытаниях образцов сплавов выделялись по активности сигналов АЭ, излучаемых различными типами источников (дислокации, микро- и макротрещины). Разделение на типы источников было выполнено на основании анализа распределения «энергия сигналов АЭ vs частотный параметр K_f ». По результатам циклических испытаний до разрушения образцов с различными значениями максимальных напряжений по выделенным стадиям были построены обобщенные диаграммы усталости некоторых сплавов.

Схематически характер интегрального накопления сигналов АЭ, испускаемых различными источниками АЭ представлен на рис. 1.

На основании обобщенных графиков интегрального накопления сигналов АЭ, полученных в процессе испытаний сплавов алюминия, титана и стали были выделены стадии усталостного разрушения. Эти этапы были выделены на основе анализа источников АЭ.

По сигналам АЭ, зарегистрированным во время испытаний, были построены диаграммы двухпараметрического распределения $E_{АЭ} - K_f$. На рисунке 2 представлены диаграммы двухпараметрических распределений $E_{АЭ} - K_f$ сигналов АЭ, зарегистрированных в образцах алюминиевого сплава 2024, доведенных до разрушения с различной амплитудой напряжения цикла.

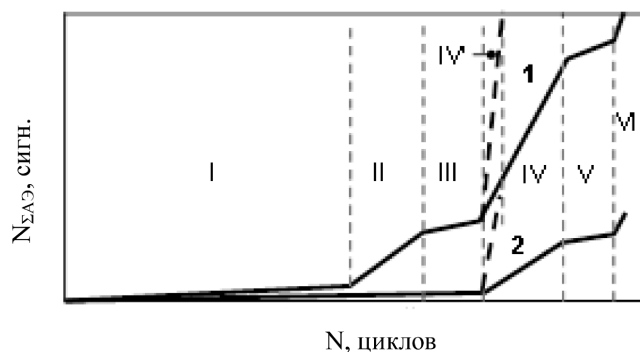


Рис. 1. Графики интегрального накопления сигналов АЭ, зарегистрированных при циклической деформации до разрушения образца:
 1 – сигналы АЭ, излучаемые дефектами дислокационного типа;
 2 – сигналы АЭ, излучаемые микротрещинами

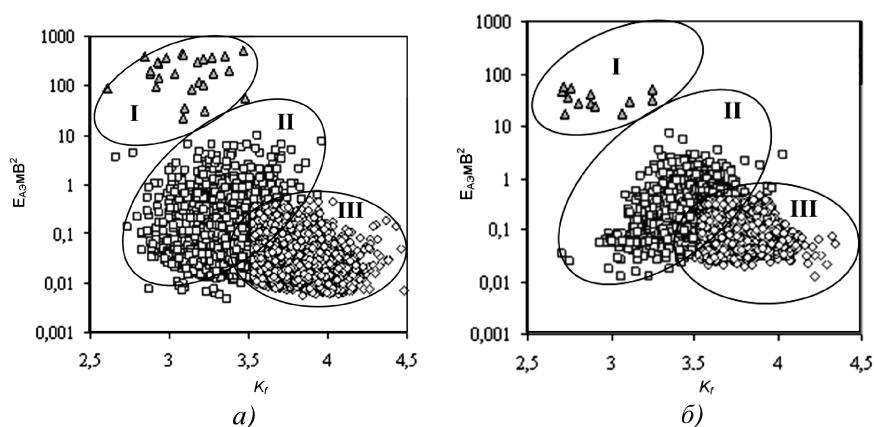


Рис. 2. Двухпараметрическое распределение $E_{AЭ} - K_f$ сигналов АЭ при испытании образцов сплава 2024 (I – макротрещины, II – микротрещины, III – дислокации (источники пластической деформации)):
 а – $\sigma_{\max} = 218$ МПа; б – $\sigma_{\max} = 235$ МПа

На распределении $E_{AЭ} - K_f$ сигналы АЭ были разделены на различные группы по методике, которая была разработана ранее для материалов при статическом испытании. По данной методике сигналы разделялись на источники АЭ различных типов: дислокации, микротрещины и макротрещины.

Распределение $E_{AЭ} - K_f$ показывает особенности разделения сигналов АЭ, на типы источников и характерные признаки классификации:

- 1) дислокации: $(K_f > 3,5) \cap (E_{AЭ} < 0,5 \text{ мВ } 2 \text{ сек})$;
- 2) микротрещины: $((0,5 < E_{AЭ} < 20 \text{ мВ } 2 \text{ сек}) \cap (K_f > 3,5)) \cup ((E_{AЭ} < 20 \text{ мВ } 2 \text{ сек}) \cap (K_f < 3,5))$;
- 3) макротрещины: $(K_f < 3,5) \cap (E_{AЭ} > 20 \text{ мВ } 2 \text{ сек})$.

Макротрещины отличались от микротрещин большей, чем 5...10 мкм величиной раскрытия трещины за один акт излучения сигнала АЭ.

В отличие от классических испытаний на выносливость, исследования, изложенные в работе, были проведены при небольшом числе образцов на каждую точку испытаний и не превышали трех. Каждый из образцов исследуемого материала имеет абсолютно индивидуальную структуру, которая в рамках доверительной статистики является основным фактором, определяющим выносливость материала при заданном уровне напряжений. На основании предложенной гипотезы об эволюции дефектной структуры материала, при циклическом нагружении должны соблюдаться общие закономерности регистрации сигналов АЭ в процессе накопления усталости [3].

На каждом из графиков можно выделить множество небольших стадий, вызывающих изменение наклона кривых счета АЭ, учитывая не стационарное развитие процесса накопления усталости. На основании диа-

грамм счета АЭ, полученных при испытании сплавов алюминия, титана и сталей при различных значениях максимального напряжения цикла, были выделены стадии циклической усталости. Данные стадии были выделены на основании анализа характера накопления сигналов АЭ, излучаемых различными источниками АЭ. Стадия I имеет незначительную протяженность и характеризуется сравнительно низкой активностью сигналов АЭ обоих типов. На стадии II происходит повышение активности сигналов АЭ дислокационного типа, связанное с общей циклической текучестью, и средняя скорость счета АЭ за период действия стадии II достигает максимума в сравнении с остальными стадиями. Активность сигналов АЭ, излучаемых микротрещинами, на стадии II минимальна. Стадия III, как правило, наиболее протяженная и протекает при низкой скорости счета сигналов АЭ всех типов. На стадии III протекают основные процессы упрочнения либо разупрочнения сплава. Стадия IV характеризуется повышением активности сигналов АЭ, излучаемых при образовании микротрещин и сигналов АЭ дислокационного типа. На стадии V активность сигналов АЭ дислокационного типа и излучаемых микротрещинами может снизиться за счет локализации деформации при объединении множественных микротрещин в небольшое число макротрещин. На кратковременной стадии VI происходит лом образца, сопровождающийся всплеском активности сигналов всех типов за счет высокой скорости роста магистральной трещины. По выделенным стадиям для алюминиевого сплава 2024 и углеродистой стали 20 были построены обобщенные диаграммы усталости (рис. 1).

Литература

1. **Иванова В.С., Терентьев В.Ф.** Природа усталости металлов. М.: Металлургия, 1975. 456 с.
2. **Терентьев В.Ф.** Усталостная прочность металлов и сплавов. М.: Интермет Инжиниринг, 2002. 288 с.
3. **Иванова В.С.** Синергетика: прочность и разрушение металлических материалов / В.С. Иванова. М.: Металлургия, 1992. 159 с.

АЭ КОНТРОЛЬ СОСУДА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ ПРОЧНОСТИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ДО РАЗРУШЕНИЯ

Быков С.П., Фиклистов А.Г., Петухов Ю. В., Скрябиков И.Н.
ОАО «ИркутскНИИХиммаш», г. Иркутск, Россия

Техническое диагностирование оборудования, отработавшего нормативный срок службы, является важным звеном в деле обеспечения промышленной безопасности на предприятиях нефтепереработки и нефтехими-

мии. Одним из ключевых элементов технического диагностирования, дающим информацию о фактическом состоянии сосудов и аппаратов является комплекс методов неразрушающего контроля на основе акустической эмиссии (АЭ), поскольку данный метод позволит выявить процессы образования трещин на ранних стадиях и проследить динамику их развития.

Исследуемый сосуд высокого давления, сепаратор-маслоотделитель, был изготовлен в Германии в 1938 г., прошел техническое диагностирование после 65 лет эксплуатации и был допущен к дальнейшему использованию на давление 29 МПа и температуру $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, размеры сосуда указаны на рис. 1.

Исследования прочности проводили на специальном стенде высокого давления, стенд оснащен арматурой с дистанционно управляемыми клапанами и триплекс-насосом фирмы «Balcke» производительностью 36 л/мин, способного на одном плунжере поднимать давление до 200 МПа.

Исследования проводили в три этапа.

1. Исследования до нагружения: нанесение сетки (93×100 мм), УЗ-толщинометрия (по сетке), измерение сетки, длин окружности и диаметров, измерение твердости (по сетке), неразрушающий контроль капиллярным, магнитопорошковым и ультразвуковым методами в объеме 100 % с наружной поверхности.

2. Исследования под давлением: тензометрия, циклическая нагрузка с постоянным контролем методом акустической эмиссии (АЭ) и периодическим ультразвуковым контролем (УЗК), выборочным измерением сетки и длин окружностей.

3. Исследования после разрушения: измерение сетки, длин окружности, измерение твердости, неразрушающий контроль, определение механических свойств на образцах.

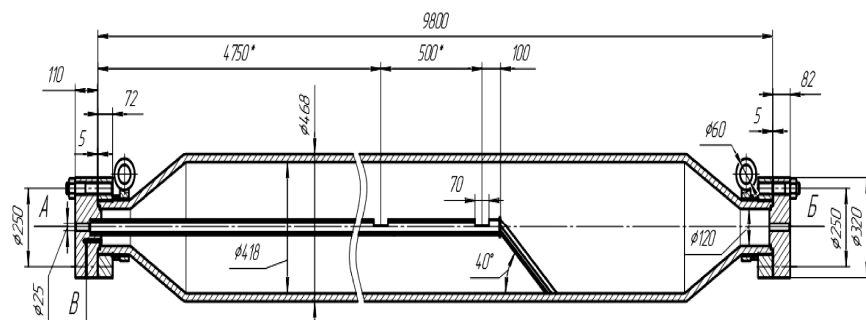


Рис. 1. Сепаратор-маслоотделитель

Рабочее, расчетное и пробное давления определяли исходя из паспортных данных о механических свойствах: рабочее $p_0 = 29$ МПа, расчетное $p = 32,5$ МПа, пробное $p_{пр} = 42,5$ МПа.

В соответствии с разработанной методикой сосуд нагружали по следующей схеме:

1. 0 – 10 – 20 – p_0 – $p_{пр}$ – выдержка 30 мин – 0
2. 0 – 10 – 20 – p_0 – 0
3. 0 – 10 – 20 – p_0 – 0

Акустико-эмиссионный контроль проводился на всех этапах испытания сосуда с помощью 14 каналов АЭ-системы ALine – 32D. В результате калибровки были получены следующие акустические характеристики: скорости – 4800, 3200 и 1600 м/с, затухание – 4 дБ/м. В соответствии со схемой расстановки преобразователей и полученными в ходе калибровки скоростями были созданы три локационные группы.

Рабочим давлением p_0 было дано 100 циклов. После контроля, который не выявил никаких дефектов, сосуд был нагружен 1000 циклами пробным давлением 42,5 МПа. Методами АЭ и УЗК никаких дефектов не было выявлено.

Общее число и порядок нагружения сепаратора приведены в табл. 1.

Таблица 1

p , МПа	p_{\max} , МПа	$p_{\text{ср}}$, МПа	p_{\min} , МПа	Количество циклов
29	29,99	29,49	29,0	100
32,5	32,97	32,49	31,98	100
42,5	43,49	42,98	42,5	1000
65	65,93	65,51	65,14	10
80	80,99	80,53	80,01	200
82	82,99	82,5	82,0	149
83	83,97	83,56	83,0	50
84	84,99	84,48	84,0	100
85	85,99	85,48	85,04	90
90	90,98	90,5	90,01	110
94,5	–	–	–	1
96,5	–	–	–	1

p , МПа	p_{\max} , МПа	$p_{\text{ср}}$, МПа	p_{\min} , МПа	Количество циклов
97	97,96	97,44	97,06	13
98	98,78	98,53	98,18	11
106	–	–	–	1
112		давление разрушения		1

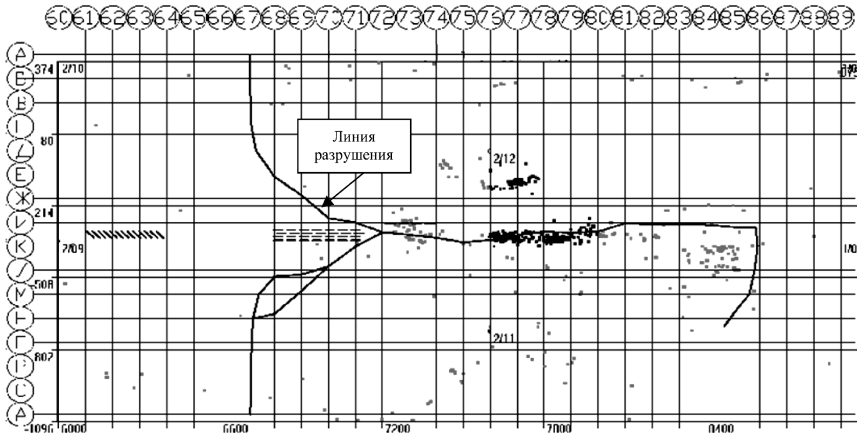


Рис. 2. Локационная карта за все время испытаний с привязкой к координатной сетке и линии разрушения сосуда

После проведения 200 циклов с повышением давления до 80 МПа и сбросом до нуля по результатам АЭ была выявлена зона локации. По результатам УК в местах локации АЭ обнаружена сетка дефектов разного направления площадью от 0,6 до 1,0 мм²

После проведения 87 циклов с повышением давления до 82 МПа и сбросом до нуля снова проведен ультразвуковой контроль. Площадь зафиксированных дефектов увеличилась от 0,6 до 1,2 мм².

Выводы:

- методом акустической эмиссии зафиксирован процесс образования трещин на внутренней поверхности сепаратора, подтвержденный результатами УЗК после нагружения циклами давлением 80 МПа;
- место зарождения трещины, ставшей причиной разрушения сосуда прослеживается на локационной карте на всех этапах нагружения начиная с циклирования на 80 МПа.

ЛОКАЦИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Бяков А.В.¹, Панин С.В.^{1,2}, Башков О.В.³,
Полтаранин М.А.¹, Бурков М.В.¹

¹*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
г. Томск, Россия;*

²*Национальный исследовательский Томский политехнический
университет, г. Томск, Россия;*

³*ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический
университет», г. Комсомольск-на-Амуре, Россия*

Метод акустической эмиссии (АЭ) является методом неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики, в основе которого лежит физическое явление, связанное с излучением механических (упругих) волн, вызванных динамической локальной перестройкой внутренней структуры нагруженного твердого тела [1]. АЭ содержит важную информацию о состоянии объекта контроля, однако в настоящее время возможности данного метода используются не более чем на 10...15 % [2].

Особенностью метода АЭ, является возможность определения типа дефекта (идентификация дефектов), оценки его параметров (размера, ориентации, скорости развития и пр.), а также местоположения в материале (локация источников). Решать эти задачи можно несколькими путями: например, с применением сложных аппаратных реализаций приборов контроля (на основе многоканальных цифровых сигнальных процессоров), либо с помощью математических и алгоритмических решений, способных как с обучением, так и без такового, обеспечивать получение информации о состоянии и эволюции дефектной системы в контролируемом объекте. Последний подход, к сожалению, ограничивает использование таких систем для анализа сигналов АЭ в реальном времени и практически не применяется при изготовлении промышленных систем НК.

Для лабораторных/исследовательских систем, которые должны обладать высокой чувствительностью, и не имеют заметных ограничений по быстродействию алгоритмов обработки информации, получение данных о состоянии внутренней структуры и эволюции дефектов является одной из наиболее важных задач. Поэтому развитие алгоритмов постобработки и анализа данных АЭ с последующей интерпретацией является актуальной задачей. В литературе по применению промышленных систем АЭ традиционно регистрируют и анализируют следующие ее информационные параметры: накопление событий, активность, амплитуда, энергия и др. [3, 4]. Применение вейвлет-преобразования при обработке и анализе сигналов АЭ расширяет возможности метода и находит свое применение в процессе

идентификации и локации источников, фильтрации сигналов и др. [5 – 7]. Поскольку вейвлет-преобразование обеспечивает двумерную «развертку» сигнала в частотной и временной областях, его применение является удобным инструментом для изучения и количественной характеристики свойств сигналов АЭ. Стоит отметить, что понятие вейвлет ввели Grossmann и Morlet в середине 80-х гг. прошлого века при решении задач анализа свойств сейсмических и акустических сигналов [8].

Целью данной работы было оценить возможности применения вейвлет-преобразования с использованием двух типов вейвлетов для анализа сигналов АЭ, полученных с помощью преобразователем акустической эмиссии (ПАЭ) резонансного типа GT 200.

В работе показано, что применение вейвлет-преобразования для обработки и анализа данных АЭ обладает значительными преимуществами перед анализом сигналов во временной области. Показано, что вейвлет Габора позволяет более точно локализовать частотные свойства сигнала, по сравнению с вейвлетом Гаусса.

Продемонстрировано, что точность и корректность определения скорости распространения акустической волны в стальной пластине может быть существенно повышена при использовании вейвлет-спектрального анализа, нежели чем при локации с использованием огибающей переднего фронта с пороговым срабатыванием.

Применение вейвлет-преобразований позволяет снизить ошибку определения разности времени прихода сигналов АЭ, и, соответственно, точность локации источников АЭ, до 4-х раз.

Литература

1. **Иванов В.И., Белов В.М.** Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений. М.: Машиностроение, 1981. 184 с.
2. **Ivanov V.I.** The Prime Problems of Acoustic-emission Diagnostics of Technical Devices and Constructions. 10th European Conference on Non-destructive Testing. Moscow, 2010, June 7 – 11. URL: http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_07_03.pdf
3. **Плехов О.А., Пантелеев И.А., Леонтьев В.А.** Особенности выделения тепла и генерации сигналов акустической эмиссии при циклическом деформировании армо-железа // Физическая мезомеханика. Т. 12. № 5. С. 37 – 43.
4. **Костков Е.Н., Вахмистров С.А., Игошина С.Г., Колмаков О.В.** Акустическая эмиссия при механических испытаниях образцов из пластифицированного октогена // Физическая мезомеханика. Т. 16. № 5. С. 111 – 114.
5. **Hamstad M.A., O’Gallagher A., Gary J.** A Wavelet Transform Applied to Acoustic Emission Signals: Part 1: Source Identification // Journal of Acoustic Emission. 2002. Vol. 20. P. 39 – 61.

6. Hamstad M.A., O’Gallagher A., Gary J. A Wavelet Transform Applied to Acoustic Emission Signals: Part 2: Source Location // Journal of Acoustic Emission. 2002. Vol. 20. P. 62 – 82.

7. Степанова Л.Н., Тенитилов Е.С. Локализация источников акустической эмиссии в объектах с малыми геометрическими размерами // Дефектоскопия. 2012. № 11. С. 62 – 72.

8. Grossmann A, Morlet J. Decomposition of Hardy Functions into Square Integrable Wavelets of Constant Shape. SIAM Journal on Mathematical Analysis. 1984. Vol. 15. № 4. P. 723 – 736.

МЕТОДИКА РАЗДЕЛЕНИЯ ЛОКАЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ПРИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОМ КОНТРОЛЕ АППАРАТОВ, СОДЕРЖАЩИХ ВНУТРЕННИЕ УСТРОЙСТВА

Гомера В.П.¹, Нефедьев Е.Ю.², Смирнов А.Д.¹
¹ООО «Киришиннефтеоргсинтез», ²ОАО «НПО ЦКТИ»

Аннотация: В данной работе рассмотрена проблема, возникающая при АЭ диагностике корпусов теплообменного оборудования, связанная с разделением источников на планарные и объемные. Предложены приемы анализа данных для решения задачи разделения данных от источников, расположенных в материале корпуса и внутри аппарата (в теплообменных трубках и других внутренних элементах) на примерах тестирования промышленного оборудования.

Ключевые слова: акустическая эмиссия (АЭ), теплообменник, планарная и трехмерная локация, критерий достоверности локации

Описание проблемы

Кожухотрубные теплообменные аппараты являются наиболее распространенным типом теплообменного оборудования. В общем случае теплообменник состоит из корпуса, пучка труб, укрепленного в трубных досках, крышек, распределительных камер, патрубков и опор. Трубное и межтрубное пространства в этих аппаратах разделены между собой. Особенностью данного типа аппаратов является наличие трубного пучка внутри корпуса, занимающего практически все внутренне пространство аппарата.

В стандартной практике метод АЭ используется для диагностики только корпусной части теплообменников при проведении гидравлического испытания корпуса. Однако при испытании такого оборудования сигналы АЭ могут исходить не только от источников в материале корпуса, но и от источников, расположенных в элементах трубного пучка. Такие сигналы через испытательную среду (воду) передаются на корпус теплообменника и регистрируются установленными на нем датчиками как локационные события-артефакты (рис. 1).

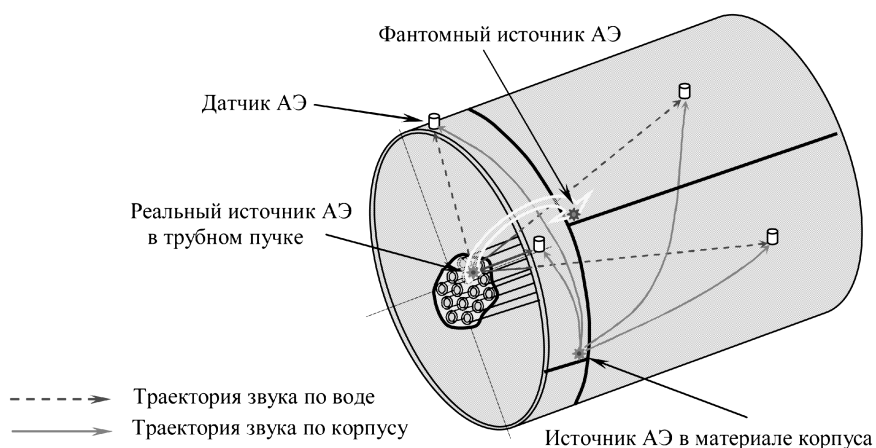


Рис. 1. Схема образования ложных (фантомных) локационных АЭ источников при контроле корпуса теплообменного аппарата

Выбор локационных алгоритмов

При АЭ контроле используются два основных подхода к локализации источников АЭ: зональный метод и триангуляционный (точный) метод определения их местоположения. Согласно результатам исследования по сравнительной эффективности методов зональной и триангуляционной локации, представленным в работе [1], использование триангуляционных схем является предпочтительным, так как они позволяют существенно сократить уровень погрешности измерения, позволяя, кроме этого, производить расчет амплитуды в источнике.

Возможность применения точных, триангуляционных схем локации (планарной и трехмерной) при контроле крупных конструкций связана с повышенными требованиями к качеству АЭ системы (многоканальность, высокая чувствительность, высокая производительность, эффективное ПО). Аппаратура (AMSY-5 производства “Vallen Systeme”, ФРГ) отвечает данным требованиям, поэтому использование различных алгоритмов триангуляционной локации является в нашей практике одним из основных инструментов анализа данных. Стандартное ПО системы содержит набор алгоритмов (локационных процессоров) для различных приложений. Используя модульную структуру анализа данных, в результате выполнения серий последовательных логических и расчетных операций над ними, можно решать широкий спектр задач, в том числе и нестандартных. В некоторых случаях, для решения конкретных практических задач целесообразной является разработка собственных программных средств обработки данных. Это дает возможность использования дополнительных приемов анализа информации.

Для решения проблемы локации предлагается критерий $P(R)$, оценивающий достоверность локации по степени соответствия между измеренными временными характеристиками и расстояниями, рассчитанными в рамках работы стандартного локационного алгоритма. Данный параметр позволяет разделить локационные серии на «планарные» источники АЭ и «объемные» источники АЭ. Предлагается использовать диагностические правила, разработанные как в рамках стандартного ПО, так и с применением средств C++Builder, для проведения процедуры разделения локационных событий по степени соответствия между измеренными временными характеристиками и расстояниями, рассчитанными в рамках работы стандартного локационного алгоритма. Процедуру классификации предлагается встроить в стандартную систему обработки данных АЭ контроля.

Примеры использования методики

Рассмотрены результаты применения предложенных диагностических правил при обработке данных АЭ контроля промышленных теплообменников.

Пример 1. Корпус сырьевого теплообменника предварительной гидроочистки риформинга. Анализ данных АЭ контроля определил, что 5 из 11 зон АЭ активности на корпусе образованы событиями, являющимися артефактами по отношению к обечайке. Дополнительный контроль методом УЗК подтвердил правильность проведенного анализа.

Пример 2. Корпус сырьевого холодильника установки гидроочистки бензина.

Были выявлены три зоны АЭ активности, одна из которых была классифицирована как зона истинных АЭ событий (Зона № 1), а две – как зоны кластеризации артефактов (Зоны № 2 и № 3). В Зоне № 1 при дополнительном обследовании было выявлено значительное изъязвление внутренней поверхности корпуса. Формирование локационных кластеров в Зоне № 2 и Зоне № 3 было связано с наличием участков в трубном пучке, на которых трубки подверглись интенсивному коррозионному воздействию.

Эти результаты позволяют сделать вывод о том, что существует принципиальная возможность одновременно с традиционной АЭ диагностикой корпуса теплообменника регистрировать наличие дефектов (по крайней мере, трещиноподобных) в элементах его трубного пучка.

Выводы

Предложенная методика анализа данных для разделения источников АЭ по их расположению в технологических аппаратах, содержащих внутренние устройства, позволяет:

1) повысить достоверность АЭ контроля корпусов теплообменного оборудования;

2) сократить количество участков дополнительного контроля по результатам АЭ и затраты на подготовку и проведение этих работ;

3) рассмотреть перспективы применения АЭ метода для локализации и ранней диагностики трещиноподобных дефектов элементов трубного пучка теплообменного оборудования по результатам одновременного комплексного АЭ контроля аппаратов;

4) предложенный подход к анализу данных АЭ тестирования теплообменников можно распространить на другие виды технологических аппаратов, содержащих внутренние устройства (колонны, электродегидраторы и др.).

Литература

1. **Catty J.** Acoustic Emission Testing – Defining a new standard of acoustic emission testing for pressure vessels. Part 1: Quantitative and comparative performance analysis of zonal location and triangulation methods // *Journal of Acoustic Emission*. 27(2009). P. 299 – 313.

КОМПЛЕКСНАЯ ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХРУПКИХ ТЕНЗОПОКРЫТИЙ И АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Елизаров С.В.¹, Барат В.А.¹, Чернов Д.В.¹,
Матвиенко Ю.Г.², Иванов В.И.², Васильев И.Е.²
¹ГК «ИНТЕРЮНИС», ²ИМАШ РАН

В докладе рассмотрена методика комплексного использования методов хрупких тензопокрывтий и акустической эмиссии (АЭ) для диагностирования процессов деформирования конструкций и определения степени их поврежденности.

Одним из эффективных средств неразрушающего контроля для выявления дефектов и оценки прочности конструкций могут быть хрупкие покрытия, позволяющие оперативно и достаточно точно выявлять (по характеру и плотности распространения трещин в тензопокрывтии) не только зоны конструктивно-технологической концентрации напряжений, но и зоны вероятных локальных дефектов. Они могут применяться как при отработке методик контроля в лабораторных условиях, так и для контроля промышленных объектов в процессе эксплуатации. В частности оксидные тензоиндикаторы могут быть использованы для проведения исследований, как в области упругих, так и пластических деформаций (в интервале значений от 0,05 до 7 %), имеют достаточно широкий температурный диапазон от –200 до 200 °С, а при температурах –50...50 °С обладают постоянными характеристиками, работают в воде, масле и их парах, имеют относительно не

сложную технологию изготовления, и в течение длительного времени сохраняют характеристики стабильными (не менее 5 лет). Ограничение применения метода хрупких покрытий обусловлено локальностью установки тензопокрывтий, а также необходимостью визуального контроля за процессом трещинообразования.

Метод АЭ позволяет регистрировать и контролировать протекание динамических процессов в твердых телах, которые сопровождаются излучением упругих волн. К таким процессам относятся акты пластической деформации в материалах, образование микро мезо и макротрещин, а также развитие магистральных трещин при различных механизмах разрушения. Возможен контроль этих процессов как в условиях статического, так и циклического нагружения. Преобразователи АЭ, размещенные на объекте в определенных местах, позволяют контролировать не только поверхность объекта, но и весь объем материала, включая внутренние области конструкции.

Совместное использование хрупких тензопокрывтий и акустико-эмиссионной системы позволяет сочетать в себе достоинства, присущие каждому из упомянутых методов, и при этом лишено недостатков, свойственных этим методам в отдельности. Требуемый эффект достигается путем установки в наиболее нагруженных зонах диагностируемого изделия хрупких тензопокрывтий с величиной пороговой деформации меньше или равной предельно допустимой для безопасной эксплуатации конструкции, а для дистанционного контроля их состояния (регистрации и локации образующихся трещин) используется АЭ система.

В докладе представлены результаты исследования комплексного применения хрупких покрытий и АЭ при исследовании образцов из алюминиевых сплавов и композиционных материалов. Отработка методики выполнялась с использованием плоских образцов при их испытаниях на растяжение.

Исходя из особенностей АЭ импульсов, возникающих при разрушении хрупкого слоя покрытия, были выбраны комбинированные параметры, характеризующие скорость затухания и усредненную частоту осцилляций импульса, в поле которых возможно отличать АЭ сигналы образования трещин в тензоиндикаторе от всех других сигналов, возникающих в процессе испытания изделий. Для классификации регистрируемых сигналов АЭ было специально разработано программное обеспечение, позволяющее на диаграмме дескрипторов проследить динамику формирования кластеров сигналов в процессе деформирования и разрушения объекта АЭ контроля.

Разработанная программа разделения сигналов АЭ в поле используемых дескрипторов, была успешно использована в экспериментах по ранней диагностике повреждений образцов из алюминиевых сплавов и композиционных материалов. С целью большей наглядности разделения регистрируемых сигналов был использован временной фактор, позволяющий наблюдать динамику процесса.

Проведенные экспериментальные исследования показали высокую эффективность совместного использования АЭ и хрупких тензоиндикаторов для диагностирования на ранней стадии нагружения повреждений в образцах алюминиевых сплавов и композиционных материалов. При этом осуществлялась как качественная, так и количественная оценка напряженно-деформированного состояния образцов, определялись стадии деформирования и разрушения, выявлялись потенциально опасные дефекты, велось слежение за их развитием, давался точный прогноз достижения объектом критического состояния. Совместное использование тензопокрывтий и АЭ системы позволяет с высокой степенью надежности контролировать весь процесс нагружения конструкций, начиная от упругих деформаций порядка 0,05 % – образования первых трещин в хрупком покрытии, и до значительных пластических деформаций.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННАЯ СИСТЕМА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Елизаров С.В., Барат В.А., Шиманский А.Г., Фирсов А.А.
Группа компаний ИНТЕРЮНИС, Москва, Россия

Введение

Акустико-эмиссионный (АЭ) метод контроля имеет целый ряд преимуществ, выделяющих его из ряда других методов. Это пассивный метод контроля, обладающий высокой чувствительностью к обнаружению трещин, не требующий сканирования поверхности объекта, обеспечивающий дистанционное проведения контроля на участках от нескольких метров до сотен метров.

Однако метод имеет ряд недостатков – чувствительность к акустическим шумам, вызванным работой контролируемого оборудования, сложность количественной оценки параметров дефектов, высокие требования к квалификации персонала, поводящего акустико-эмиссионный контроль, обусловленные непростым интеллектуальным содержанием метода, как в части настройки аппаратуры для сбора данных, так и в оценке результатов обследования.

В настоящее время различными научными школами проводятся исследования, направленные на развитие акустико-эмиссионного метода контроля, расширение его возможностей, повышение достоверности и расширение практического применения.

В данной работе описываются принципы построения интеллектуальной акустико-эмиссионной системы, которая позволяет усовершенствовать процедуру АЭ контроля за счет автоматизации и интеллектуализации функций, которые традиционно выполняются оператором.

Характеристика интеллектуальной АЭ системы

В интеллектуальной АЭ системе предполагается автоматизация следующих функций: автоматический выбор частоты дискретизации, обеспечивающий достаточное частотное и временное разрешение при анализе данных, адаптивная фильтрация АЭ сигналов, позволяющая выполнять эффективное обнаружение АЭ сигналов на фоне различных шумов технологического оборудования, а также автоматическая регистрация данных, не требующая задания оператором временных параметров, таких как порог, мертвое время и т.д.

При регистрации данных используется беспороговый статистический метод, в котором выделение импульсов акустической эмиссии происходит на основании изменения свойств стационарного потока акустического шума. При помощи средств цифровой обработки сигналов происходит разделение импульсной и непрерывной составляющей сигнала, по характеру непрерывной составляющей могут быть идентифицированы течи, технологические шумы оборудования и непрерывная эмиссия перед разрушением.

Беспороговый метод регистрации данных

Основным блоком интеллектуальной АЭ системы является блок беспороговой регистрации данных. Традиционным способом регистрации диагностических данных при акустико-эмиссионном контроле является пороговая регистрация. При превышении акустическим сигналом определенного заданного уровня, регистрируется импульс акустической эмиссии

Пороговая схема регистрации данных надежна и проста в реализации, но имеет ряд существенных недостатков. Во-первых, выбор порогового значения находится в компетенции оператора, из-за влияния человеческого фактора, значение порога может быть установлено неверно. Во-вторых, при пороговой регистрации данных время прихода сигнала определяется по моменту пересечения сигналом порогового значения, такой метод не позволяет определить точное значение времени прихода сигнала, а погрешность определения времени прихода приводит к погрешности определения координат источников акустической эмиссии. В-третьих, пороговый метод регистрации данных предполагает импульсную модель АЭ, при которой импульсы акустической эмиссии наблюдаются на фоне стационарного шума. Если эмиссия носит непрерывный характер, или импульсная АЭ наблюдается на фоне нестационарного шума, пороговая регистрация данных будет проводиться некорректно.

В качестве альтернативы пороговому методу может быть предложен интеллектуальный беспороговый метод, основанный на теории обнаружения сигналов. В рамках данного метода импульсы акустической эмиссии выявляются как фрагменты непрерывного потока данных, обладающие определенными временными и спектральными характеристиками. При реали-

зации метода были использованы алгоритмы обнаружения разладки, работающие в режиме on-line, а также адаптивная и согласованная фильтрация данных. Применение интеллектуального беспорогового метода регистрации данных позволяет в режиме on-line точно определять время прихода импульсов акустической эмиссии, а также за счет применения адаптивной фильтрации, выявлять импульсы с амплитудой ниже уровня шума.

Преимущества интеллектуальной АЭ системы по сравнению с традиционной

Представленная АЭ система имеет целый ряд преимуществ. Интеллектуальная АЭ система позволяет повысить точность и достоверность результатов АЭ контроля, так как прецизионное обнаружение импульсов акустической эмиссии позволяет уточнить результаты локации источников АЭ и скорректировать результаты их критериальной оценки.

Автоматическое определение настроечных параметров позволяет сократить время проведения процедуры АЭ контроля и уменьшить влияние человеческого фактора на его результаты.

Литература

1. **Неразрушающий** контроль. Т. 7. Справочник / Под общ. ред. В.В. Клюева; В.И. Иванов, И.Э. Власов. Кн. 1.
2. **Barat V., Borodin Y., Kuzmin A.** Intelligent AE Signal Filtering Methods // Journal AE. 2010. V. 28. P. 109 – 119.
3. **Харевов В.Г., Попков Ю.С.** Автоматизированные системы комплексного коррозионного мониторинга и перспективы применения метода АЭ в их составе // В мире НК. № 3[41]. Сентябрь, 2008.
4. **Barat V.A., Alyakritskij A.L.** Automated Method for Statistic Processing of AE Testing Data // Journal AE. 2008. V. 28. P. 132 – 141.

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПАРАМЕТРЫ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Лончаков С.З., Башков О.В., Муравьев В.И., Фролов А.В.
*ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный
технический университет», г. Комсомольск-на-Амуре, Россия*

Введение: надежность инженерных сооружений и конструкций в большой степени определяется способностью противостоять повреждаемости при эксплуатационных нагрузках. Наличие концентраторов напряжений может оказывать катастрофическое влияние на прочность металлоконструкций.

Исследованиями [1, 2] была установлена возможность прогнозирования количественных показателей механических свойств материалов на примере образцов сплава ОТ4, путем использования анализа акустико-эмиссионной информации на стадии упругой деформации, а именно установлена зависимость между механическими характеристиками материала и параметрами акустической эмиссии (АЭ).

В работе представлены результаты теоретического и экспериментального исследования влияния величины концентрации напряжений α на повреждаемость титановых сплавов ОТ4 и ВТЗ-1. Для оценки влияния концентрации напряжений на параметры АЭ была проведена серия экспериментов на образцах с концентраторами напряжений различных радиусов по 10 образцов на каждый. Исследовались образцы из двух титановых сплавов ОТ4 (α -класс) и ВТЗ-1 ($\alpha + \beta$ -класс). Концентраторы напряжений выполнялись в виде выточек по краям рабочей части образцов. Радиусы концентраторов составляли 0,5, 2,0, 5,5 и 12,0 мм. Все эксперименты данной серии проводились при скорости деформирования $v_2 = 71,1$ мм/ч.

Регистрация сигналов АЭ проводилась с использованием разработанного АЭ комплекса [3] по методике, представленной в работе [4]. Для анализа АЭ информации использовались следующие параметры АЭ сигналов: амплитуда, длительность, энергия, плотность энергии и проводилось разделение АЭ сигналов по типам генерирующих их источников по специальной методике [5].

Число излучающих дефектов имеет степенную зависимость от действующих напряжений [6]:

$$N \sim A\sigma^n, \quad (1)$$

где A – коэффициент пропорциональности; σ – действующие в материале напряжения; n – показатель степени.

Увеличение коэффициента концентрации напряжений ведет к увеличению напряжений, действующих в месте концентрации (местных напряжений).

$$\alpha = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n}, \quad (2)$$

где α – коэффициент концентрации напряжений; σ_{\max} – наибольшее местное напряжение; σ_n – номинальное напряжение.

Номинальное напряжение определяется как среднее в ослабленном сечении

$$\sigma_n = P/d,$$

где P – усилие в сечении; d – площадь ослабленного сечения, называемая площадью нетто.

На основании выражений (1) и (2) выведено соотношение, показывающее, что при постоянном значении номинального напряжения

($\sigma_n = \text{const}$) число источников АЭ пропорционально концентрации напряжений α : $N \sim \alpha^n$.

Справедливым будет утверждение, что объем материала, вовлекаемого в деформацию, пропорционален этому отношению $v \approx r/d$.

Наиболее вероятно, что данная зависимость не является линейной. Максимальное напряжение в ослабленном сечении пропорционально концентрации напряжений $\sigma_{\text{max}} \sim \alpha$, что следует из выражения (2). Очевидно, суммарное число излучающих дефектов N при определенной концентрации напряжений может быть рассчитано как произведение числа дефектов – источников импульсов АЭ для единичного объема $N_{\text{уд}}$ и объема материала V , вовлекаемого в деформацию при коэффициенте концентрации α_n

$$N = N_{\text{уд}} V. \quad (3)$$

Эффективный коэффициент концентрации напряжений определяется как отношение разрушающей нагрузки P_1 для образца без концентратора к разрушающей нагрузке P_2 такого же образца, но с концентратором напряжений $K = P_1 / P_2$.

Как правило, эффективный коэффициент оказывается меньше теоретического, его величина находится в пределах $1 \leq K \leq \alpha$.

Серия проведенных экспериментов позволяет подтвердить с некоторой степенью вероятности справедливость предложенной модели (рис. 1). Все данные АЭ приведены не как средние значения для серии испытаний из n образцов, а как результаты АЭ при растяжении конкретного образца, параметры АЭ для которого наиболее близки к средним значениям основных параметров АЭ. На гистограммах представлены значения параметров АЭ на момент разрушения образца. Для сплава ОТ4 максимальный суммарный счет сигналов соответствует радиусу концентратора 2 мм, минимальное – радиусу 5,5 мм.

На кривой суммарного счета сигналов АЭ можно пронаблюдать подтверждение предложенного утверждения о характере распределения суммарного счета сигналов. При анализе экспериментальных данных установлено, что разброс номинальных разрушающих напряжений для образцов с концентраторами напряжений довольно велик и может достигать 30 %. Установленные зависимости открывают новые возможности изучения физических свойств материалов, так как могут быть перенесены с макроскопических объемов образцов на микрообъемы конкретных материалов. Кроме того, выявленные результаты исследований могут быть использованы для разработки методик диагностирования конструкций с точки зрения определения наименее опасной формы концентратора напряжений в конструкциях, где их наличие технологически необходимо.

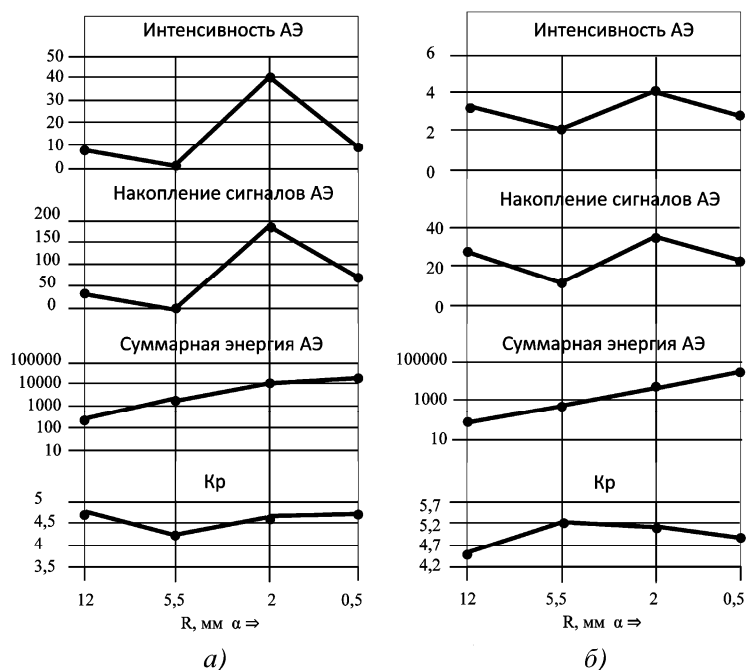


Рис. 1

Литература

1. Семашко Н.А., Муравьев В.И., Башков О.В., Фролов А.В. Прогнозирование предельного состояния сплава ОТ-4 с использованием метода акустической эмиссии // Контроль. Диагностика. 2001. № 6. С. 30–31.
2. Башков О.В., Семашко Н.А. Прогнозирование механических характеристик сплавов методом акустической эмиссии // Материаловедение. 2004. № 7. С. 41 – 44.
3. Башков О.В., Парфенов Е.Е., Башкова Т.И. Программно-аппаратный комплекс для регистрации и обработки сигналов, локации и идентификации источников акустической эмиссии // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 5. С. 67 – 72.
4. Башков О.В., Муравьев В.И., Лончаков С.З., Фролов А.В. Классификация дефектов – концентраторов напряжений по параметрам акустической эмиссии в процессе развития повреждений // Контроль. Диагностика. 2013. № 7. С. 34 – 39.
5. Башков О.В., Панин С.В., Семашко Н.А., Петров В.В., Шпак Д.А. Идентификация источников акустической эмиссии при деформации и разрушении стали 12Х18Н10Т // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. № 10. С. 51 – 57.

6. **Иванов В.И., Быков В.П.** Классификация источников акустической эмиссии // Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. 1985. № 1. С. 67 – 74.

ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЙ СИСТЕМЫ АЕС-USB ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТРУБ В ПРОЦЕССЕ ИХ ГИДРОИСПЫТАНИЙ

Милецкий Б.И., Ткаченко А.А., Шарапановский Д.В.
НИИНК АО «Интроскоп», Кишинев, Молдова

В докладе рассмотрены особенности построения и применения системы акустико-эмиссионного контроля АЕК НКТ для автоматического контроля насосно-компрессорных труб в процессе проведения их гидроиспытаний в условиях ремонтных цехов.

В НИИНК разработана система акустико-эмиссионного контроля АЕС-USB, предназначенная для приема по каналам сигналов акустической эмиссии (АЭ) и их обработки, обеспечения регистрации информативных параметров, а также определения координат источников АЭ в линейных объектах или на плоскостях по измеренным значениям разности времен прихода (РВП) сигналов к преобразователям акустической эмиссии (ПАЭ). Система может включать в своем составе до 32 каналов.

Система АЕС-USB в целом может быть применена для контроля труб в процессе их гидроиспытаний. Высокая производительность процесса контроля требует автоматизации процессов подачи трубы на участок гидроиспытаний, ее заполнения водой, установки преобразователей акустической эмиссии на трубе, поднятия давления с одновременной регистрацией, обработкой сигналов АЭ и выдачей результатов. Задачи акустико-эмиссионного контроля в данных условиях решаются с помощью специализированной программы «АЭК». Система АЕС-USB включает в себя 7 каналов. Электронный блок выполнен на базе системного блока промышленного компьютера типа РС-610.

При контроле, как правило, два крайних преобразователя АЭ устанавливаются вне тела трубы и обеспечивают постоянный акустический контакт. Учитывая, что остальные преобразователи АЭ устанавливаются на теле трубы автоматически, то их акустические контакты не постоянны и зависят от многих факторов. Процесс контроля схематически проводится следующим образом. После поступления трубы на участок и ее заполнения водой на систему поступает соответствующий сигнал, после чего происходит процесс калибровки. Вариация акустических контактов между преобразователями и телом трубы учитываются автоматически (программно) электронным блоком по сымитированным сигналам акустической эмиссии крайними преобразователями. Также уточняются наличие акустических

контактов (исправность) по каналам, скорость и затухание акустических сигналов. При определенных условиях некоторые каналы могут быть исключены при регистрации.

По окончании калибровки система выдает соответствующий сигнал и, при получении сигнала о начале поднятия давления, переходит в режим регистрации и обработки сигналов АЭ в течение ранее установленного периода времени, после чего выдает сигнал об окончании регистрации и соответствующие результаты. При регистрации система постоянно принимает и фиксирует сигнал о величине давления в трубе. Сигналы акустической эмиссии от крайних преобразователей могут быть использованы для отстройки от шумов, а также могут участвовать в локации при регистрации. При обнаружении течи программа автоматически переходит в режим регистрации течи с выдачей соответствующего сообщения на экран монитора и управляющий компьютер. Система регистрирует и выдает в реальном масштабе времени на дисплей и на компьютер верхнего уровня следующие сообщения: *течь в зоне одного из концов трубы; течь между преобразователями на теле трубы; активных источников АЭ нет; опасный источник АЭ с указанием координат источника, браковочного уровня и параметров; неработоспособен канал №...*

В программном обеспечении системы заложены следующие возможности по обработке полученных результатов (после измерений на одной трубе): *расчет спектра принятых АЭ сигналов; фильтрация сигналов; графическая информация о параметрах принятых сигналов акустической эмиссии; анализ сигналов по ПБ 03-593-03 РФ с последующей выдачей сообщений о состоянии трубы.*

Система АЭК НКТ построена на базе АЕС-USB и предназначена для автоматического акустико-эмиссионного контроля в необходимом объеме насосно-компрессорных труб в процессе проведения их гидроиспытаний в условиях ремонтных цехов. Система разработана НИИНК в рамках сотрудничества с ЗАО «НТС-Лидер» (г. Химки, Московская обл.) и может быть использована для контроля более широкого ассортимента труб.

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ АЭ СТЕНДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Муравьев В.В.

*Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова, г. Ижевск, Россия*

В 2000–2001 гг. в условиях дефицита боковых рам и надрессорных балок грузовых вагонов в ОАО «РЖД» (МПС) принято решение о продлении срока службы литых деталей тележек модели 18-100 по техническому со-

стоянию более чем на 30 лет. Основной методики продления срока службы явился метод акустической эмиссии, дополняющий магнитные методы. Основанием для внедрения акустико-эмиссионного (АЭ) метода послужили исследования, проведенные в Сибирском государственном университете путей сообщения (СГУПС) в период 1994 – 1999 гг. под руководством автора этих строк, позволившие разработать методику и автоматизированные АЭ стенды для диагностирования боковых рам и надрессорных балок. Испытания разработанных АЭ стендов и феррозондовых и вихретоковых дефектоскопов относительно магнитопорошкового метода в вагонном ремонтном депо Нижнеудинск (2001 г.) показали их значительно более высокую вероятность обнаружения дефектов (85 % – СЦАД-16 и 74 % – А-Line) по сравнению с феррозондовым (42 %) и особенно вихретоковым (35 %) методами.

Начиная с 1998 г. свыше 110 вагонных ремонтных предприятий были оснащены АЭ стендами, разработанными в СГУПС совместно с Сибирским НИИ авиации (СЦАД-16) и в ПКБ ЦВ ОАО «РЖД» совместно с ООО «Интерюнис» (А-Line). Продление срока службы литых деталей методом АЭ производится в соответствии с методикой № 682-2005 ПКБ ЦВ, которая внедрена во всех железнодорожных администрациях, входящих в состав СНГ.

Автоматизированные многоканальные диагностические АЭ стенды на основе СЦАД позволяют определять координаты источников сигналов АЭ и их характеристики с одновременной регистрацией параметров нагружения. Нагружение боковой рамы осуществляется в двух направлениях:

- горизонтальное нагружение на челюсти буксового проема до 12 тс;
- вертикальное нагружение на рессорную площадку с опорой на буксовые проемы до 36 тс.

Вертикальное нагружение надрессорной балки осуществляется в двух положениях: изгиб балки вверх до 72 тс; изгиб балки вниз на подпятник до 64 тс.

Техническое освидетельствование и продление срока службы боковых рам и надрессорных балок производится после визуально-измерительного контроля (ВИК), по результатам которого выбраковываются литые детали с видимыми дефектами, затем следуют магнитные методы в определенных зонах (технологические окна, буксовый проем). При выявлении дефектов любым методом, деталь также выбраковывается. Детали, не забракованные по результатам магнитных методов, поступают на операцию АЭ контроля.

С начала внедрения в 1998 г. АЭ метода усилиями СГУПС в вагонных депо Кемерово и Инская (ЗапСибЖД), Тосно (ОктЖД) растет число испытанных деталей до 2004 г. (рис. 1). К 2005 г. завершено оснащение 104 головных вагонных ремонтных депо АЭ стендами СЦАД и А-Line. Вместе с освоением стендов увеличивается их производительность, которая для систем СЦАД и систем А-Line за период 2005 – 2010 гг. представлена на рис. 2.

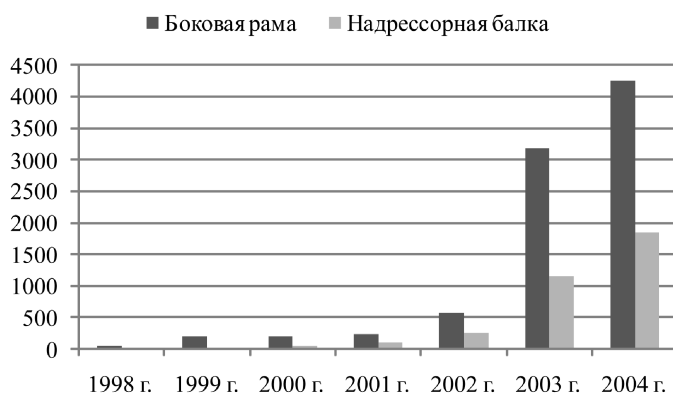


Рис. 1. Рост числа испытанных деталей стендами СЦАД на начальной стадии внедрения

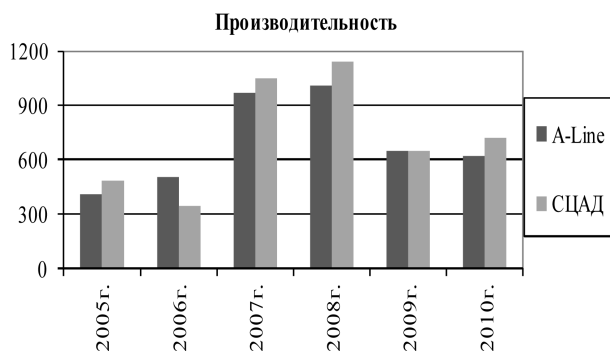
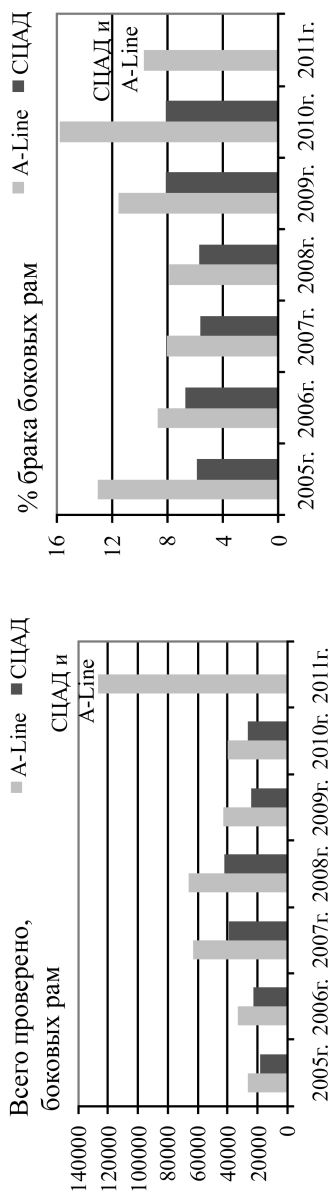


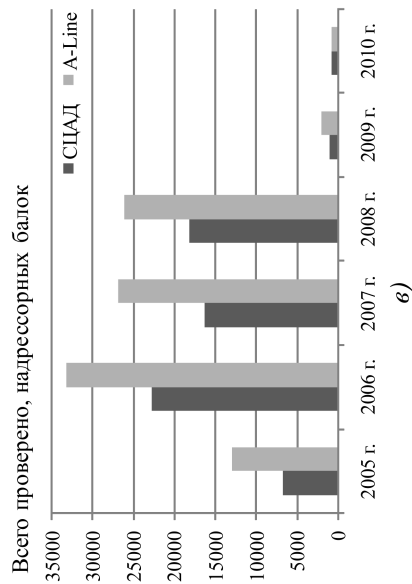
Рис. 2. Производительность систем АЭ контроля A-Line и СЦАД по годам

До 2008 г. наблюдается ежегодный рост числа диагностированных боковых рам и надрессорных балок при продлении срока службы по всем ремонтным депо ОАО «РЖД» (рис. 3, а, в). Анализ результатов эксплуатации АЭ стендов в этот период дает устойчивую тенденцию к снижению числа бракуемых деталей (рис. 3, б, г).

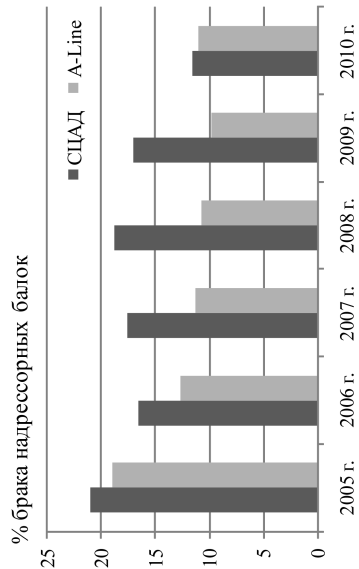
С 2009 г. ОАО «РЖД» принимает решение снизить объемы АЭ контроля по продлению срока службы боковых рам и применять АЭ контроль только для инвентарных надрессорных балок и после сходов тележек (рис. 3, а, в). В этот же период наблюдается рост числа забракованных боковых рам (рис. 3, б), что связано с вводом в отдельных ремонтных депо АЭ контроля при проведении ТО-3 для разработанных новых боковых рам коробчатого сечения после двухлетнего пробега.



а)



б)



в)

Рис. 3. Результаты АЭ контроля боковых рам и наддресорных балок по продлению срока службы (а, в) и выявление бракованных деталей по годам (б, г) с использованием систем СЦАД и А-Line

По результатам АЭ диагностики к 2013 г. продлен срок службы более 800 000 боковым рамам и свыше 200 000 наддресорным балкам с 30 до 38 лет полезного использования. За год на каждой установке АЭ контроля в разных депо испытывается от 600 до 2000 боковых рам. Особо следует отметить, что ни одна из деталей с продленным сроком службы после АЭ контроля не отказала в процессе эксплуатации. Внедрение работ по продлению срока службы литых деталей тележек грузовых вагонов позволило сэкономить ОАО «РЖД» к 2010 г. более 12 млрд. р.

В последние годы в ОАО «РЖД» принято решение о расширении объемов использования АЭ метода диагностирования боковых рам коробчатого сечения не только при продлении срока службы каждой детали с истекшим сроком эксплуатации, но и при техническом освидетельствовании после 240 тыс. км пробега, что соответствует 2-х летнему сроку эксплуатации.

Результаты пятнадцатилетней эксплуатации акустико-эмиссионных стенов при продлении срока службы литых деталей грузовых вагонов показали высокую эффективность и производительность метода АЭ. За время работы стенов продлен срок службы более 1 млн. деталей.

Работа выполнена при частичной поддержке:

- Программы инициативных проектов фундаментальных исследований, выполняемых в Учреждении УрО РАН в 2012 – 2014 гг. (регистрационный номер: 12-У-2-1013);
- Программы стратегического развития Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашникова на 2012 – 2016 гг. (ПСР/М2/Н2.5/МВВ).

К ВОПРОСУ ОБ ИЗМЕРЕНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Овчарук В.Н.

*ГОУ ВПО «Тихоокеанский государственный университет»,
г. Хабаровск, Россия*

Амплитуда сигналов АЭ и непосредственно связанные с ней энергетические характеристики являются важнейшими параметрами АЭ процесса. Их временные зависимости и многочисленные вторичные параметры, такие как суммарная амплитуда, суммарная энергия, являются основными физически обоснованными характеристиками АЭ, используемыми при прогнозировании и диагностике. От точности и достоверности их регистрации во многом зависит точность и достоверность прогнозирования разрушений.

При распространении сигнала АЭ в объекте контроля и его прохождении по электронному тракту он претерпевает значительные искажения. Существенным искажениям подвергаются как временная форма, так и частотный спектр. Искажения эти столь значительны, что восстановить форму

исходного импульса АЭ не представляется возможным. Это значит, что информация о значительной части общепринятых параметров полностью утрачивается в процессе его распространения, преобразования и регистрации. По этой причине ряд авторов считает задачу восстановления первоначальной формы сигнала АЭ некорректной [1].

Что касается энергии сигнала АЭ, то в настоящее время этот один из важнейших параметров АЭ процесса не измеряется, а вычисляется [2]. Это объясняется отсутствием относительно простых технических средств и методов, позволяющих непосредственно измерять энергию акустического сигнала в твердом теле. Энергия вычисляется по совокупности зарегистрированных с определенной точностью параметров. Для «точного» расчета энергии и многочисленных «энергетических параметров» в реальном времени применяются упрощенные методики [2, 3]. При этом используются такие характеристики сигналов АЭ, как амплитуда, характеристики временной формы мгновенного значения сигнала АЭ, временная зависимость огибающей электрического сигнала на выходе приемного ПП и другие. Проблема состоит в том, что при этом для расчета энергии АЭ необходимо задаться формой импульса, т.е. выбрать ту или иную модель...

Известно, что АЭ материала представляет собой процесс испускания упругих волн, вызванных локальной динамической перестройкой его структуры. Если учесть, что аварии и катастрофические разрушения на промышленных объектах в большинстве случаев происходят из-за образования и дальнейшего развития трещин в материале объекта, то наиболее внимание при изучении свойств АЭ следует уделить именно процессу трещинообразования. Твердое тело представляет собой случайный набор структурных образований. При рассмотрении на одном масштабном уровне его можно представить как набор зерен на поверхности разрушения. Эти зерна могут иметь случайные формы. Процесс роста трещины при этом трудно представить, как процесс последовательного разрушения его отдельных структурных образований (зерен). При этом каждому когерентному разрушению отдельного зерна будет соответствовать излучение соответствующего единичного импульса АЭ, параметры которого как не трудно предположить будут индивидуально соответствовать форме и размеру разрушившегося зерна (зерен). Последовательность сформировавшихся таким образом импульсов и образует коллективный АЭ процесс.

Из выше изложенного очевидно вытекает, что энергия сигнала АЭ от развивающейся трещины будет весьма неравномерно распределена по частотному диапазону, и эта неравномерность будет носить случайный характер [3]. Ведь каждый сигнал АЭ и, соответственно его спектр, будут являться в своем роде уникальным образованием в силу особенностей формирования и распространения. Это требует измерения энергетических и амплитудных характеристик сигнала АЭ в широкой полосе с учетом вклада всех частотных составляющих.

Объекты контроля из металлов, керамики и других материалов с высокими упругими свойствами можно с очень малой погрешностью считать линейными системами [1]. В общем случае модуль спектральной характеристики сигнала, снимаемого с выхода ПП, определяется выражением: $S_{\text{пр}}(\omega) = S_{\text{и}}(\omega) K_{\text{тр}}(\omega) K_{\text{пр}}(\omega)$, где $S_{\text{пр}}(\omega)$ и $S_{\text{и}}(\omega)$ – модули спектральных характеристик соответственно сигнала на выходе преобразователя и источника акустической эмиссии (АЭ); $K_{\text{тр}}(\omega)$ и $K_{\text{пр}}(\omega)$ – АЧХ соответственно акустического тракта (объекта контроля) и преобразователя.

Таким образом, для оценки СХ необходимо знать АЧХ не только преобразователя, но и АЧХ объекта контроля. Проведенные ранее исследования [3,4] показали, что анализ СХ сигналов акустической эмиссии невозможен без предварительной оценки АЧХ системы «объект-преобразователь». Наряду с зависимостью АЧХ объекта от координаты источника, необходимо иметь предварительные данные о СХ регистрируемых акустических колебаний. Это необходимо для выбора ПП, АЧХ которого по возможности максимально компенсирует неравномерность спектральной характеристики входного сигнала. При этом с учетом АЧХ объекта, необходимо оптимальным образом выбрать место установки ПП и его пространственную ориентацию с учетом диаграммы направленности. При невыполнении этих условий, ввиду ограниченного динамического диапазона, отдельные участки СХ будут утрачены, либо восстановлены с низкой достоверностью. Это приводит к снижению эффективности контроля и делает невозможной надежную идентификацию акустических сигналов.

Учитывая то, что в большинстве случаев неравномерность СХ реально можно лишь грубо компенсировать, рекомендуется использовать ПП с равномерной АЧХ $K_{\text{ПП}}(f) \approx \text{const}$ – равномерной по смещению; либо $K'_{\text{ПП}}(f) \approx \text{const}$ – равномерной по скорости; либо $K''_{\text{ПП}}(f) \approx \text{const}$ – равномерной по ускорению сдвиговой волны, в зависимости от формы спектральной функции реального сигнала. Так как аппаратный частотный спектр сигналов АЭ в большинстве случаев характеризуется относительным снижением уровня спектральных составляющих в области высоких частот [1, 3, 4], то предпочтительнее использовать ПП с АЧХ $K'_{\text{ПП}}(f) \approx \text{const}$, т.е. равномерной по скорости. При этом спектрограммы акустических сигналов, предварительно скорректированные по АЧХ ПП, будут представлять собой функции колебательной скорости сдвиговой волны: $S'(f_i) = \frac{S(f_i) \cdot 2\pi f_i}{K_{\text{ПП}}(f_i)}$. Следует также отметить, что использование ПП с АЧХ $K'_{\text{ПП}}(f) \approx \text{const}$ позволяет упростить получение энергетических ха-

характеристик входного сигнала, так как значение энергии электрического сигнала не сложно определить по спектральной плотности используя ра-

венство Парсеваля: $E = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [S(\Omega)]^2 d\Omega$. Для дискретного спектра с линей-

ной шкалой по оси частот значение энергии сигнала в заданном частотном диапазоне определится по простой формуле:

$$E = a \sum_{i=1}^n [S'(f_i)]^2,$$

где i – номер частотного канала; n – число каналов анализа; a – коэффициент пропорциональности, зависящий от плотности среды, чувствительности ПП, полосы анализа и интервала между дискретными точками.

Если система «объект–преобразователь» является линейной, то $a = \text{const}$. При этом функция $E(t)$ будет качественно отображать процесс изменения энергии акустического сигнала с некоторой погрешностью, вызванной дискретизацией спектра. В настоящее время энергетическую характеристику акустического излучения чаще всего получают путем возведения в квадрат амплитуды входного сигнала. При этом обязательным условием является стационарность процесса излучения (т.е. длительность исходного сигнала АЭ и его спектр должны оставаться неизменными). Многочисленные экспериментальные исследования [2, 3] показывают, что в реальных условиях эти требования не выполняются. Из этого вытекает, что наиболее приемлемым источником для определения $E(t)$ как количественно, так и качественно является спектральная функция.

Литература

1. **Неразрушающий** контроль: Справочник / Под общ. ред. В.В. Ключева. 2-е изд., испр. Т. 7: В 2 кн. Кн. 1: Иванов В.И., Власов И.Э. Метод акустической эмиссии. М.: Машиностроение, 2006. 829 с.: ил.
2. **Власов И.Э., Иванов В.И.** Сравнение алгоритмов вычисления энергии и энергетических параметров сигналов акустической эмиссии // Дефектоскопия. 1999. № 3. С. 20 – 26.
3. **Овчарук В.Н.** Акустико-эмиссионные методы исследования свойств керамических материалов / В.Н. Овчарук. Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2010. 201 с.
4. **Горбунов А.И., Лыков Ю.И., Овчарук В.Н.** Спектральные характеристики акустических сигналов при усталостных испытаниях образцов // Дефектоскопия. 1985. № 10. С. 81 – 85.

МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ АКУСТИЧЕСКО-ЭМИССИОННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Овчарук В.Н.

*ГОУ ВПО «Тихоокеанский государственный университет»,
г. Хабаровск, Россия*

По общему мнению [2 – 5] метод АЭ является одним из наиболее чувствительных методов НК. Его применение для решения задач диагностики и прогнозирования сулит огромную выгоду и, в ряде случаев, является незаменимым источником информации. Использование результатов АЭ диагностики в реальном времени при испытании ответственных и уникальных изделий позволяет не только экономить материальные ресурсы, но и решить вопросы обеспечения безопасности самого процесса испытаний. Это свидетельствует о перспективе метода.

В настоящее время существует и предлагается разработчиками довольно много разнообразных АЭ систем, соответствующих требованиям РД 03-299–99 «Требования к акустико-эмиссионной аппаратуре, используемой для контроля опасных производственных объектов» и другим нормативным документам. К сожалению, все они сложны в эксплуатации и требуют от рядового пользователя незаурядных знаний и навыков. На развертывание и настройку параметров большинства АЭ систем требуется немало времени и сил, при этом результаты контроля часто разочаровывают. Даже опытному пользователю бывает трудно принять решения по остановке и прекращению дорогостоящих испытаний, так как полученные результаты не могут быть однозначно истолкованы. Метод АЭ в настоящее время является одним из самых сложных и неоднозначных методов неразрушающего контроля. Тому есть свои причины.

Известно, что процесс разрушения твердого тела происходит путем последовательного разрушения зерен, где каждому когерентному разрушению отдельного зерна будет соответствовать излучение соответствующего единичного импульса акустической эмиссии (АЭ). Параметры этого импульса будут индивидуально соответствовать форме и размеру разрушившегося зерна, что позволяет судить не только о масштабах разрушения, но и об изменении структуры материала. Последовательность сформировавшихся таким образом импульсов и образует АЭ процесс.

При распространении сигнала АЭ в объекте контроля и его прохождении по электронному тракту он претерпевает значительные искажения. Существенным искажениям подвергаются как временная форма, так и частотный спектр. А это означает, что информация о значительной части общепринятых параметров может быть полностью утрачена в процессе его распространения, преобразования и регистрации. Кроме того в акустиче-

ском тракте не исключена возможность одновременной регистрации сигналов АЭ от различных источников с наложением шумов и помех разной физической природы. В таких условиях трудно однозначно определить, какой из параметров зарегистрированного сигнала может однозначно характеризовать процесс разрушения.

Пытаясь решить поставленные задачи, разработчики усложняют аппаратуру и порой необоснованно вводят все новые и новые параметры. Если ГОСТ 27655–88 регламентирует шесть параметров АЭ, то существующие в настоящее время авторитетное справочное пособие по неразрушающему контролю [1] рекомендует к применению двадцать шесть параметров, из которых восемнадцать являются первичными. Количество же вторичных параметров, используемых исследователями в своих работах, неуклонно растет с каждой новой диссертацией и давно превышает разумный предел. В то же время рядового пользователя интересует один вопрос – есть ли дефект? А при его обнаружении в свою очередь резонно было бы знать, насколько он опасен и где находится. Иными словами пользователю нужен один надежный критерий, по которому можно было бы безошибочно принять однозначное решение.

С точки зрения физики пользователя, прежде всего, должна интересовать энергия акустического излучения и ее распределение в пространстве и времени. Этот параметр регламентирован ныне действующим ГОСТ 27655–88, как один из основных. Тем не менее, в настоящее время этот один из важнейших параметров АЭ процесса не измеряется, а вычисляется [2]. Это объясняется отсутствием относительно простых технических средств и методик, позволяющих непосредственно измерять энергию акустического сигнала в твердом теле. Она вычисляется по совокупности параметров, а для «точного» расчета энергии и ныне существующих многочисленных «энергетических параметров» в реальном времени применяются упрощенные методики [1, 2]. Ни один из «энергетических» параметров, в том числе и популярный MARSE, даже качественно не отображают изменение энергии акустического излучения.

Энергия сигнала АЭ от развивающейся трещины весьма неравномерно распределена по частотному диапазону, и эта неравномерность будет носить случайный характер [3]. Ведь каждый сигнал АЭ и, соответственно его спектр, будут являться в своем роде уникальным образованием в силу особенностей формирования и распространения. Это требует измерения энергетических и амплитудных характеристик сигнала АЭ в широкой полосе с учетом вклада всех частотных составляющих. В то же время все без исключения нормативные документы, включая и сравнительно новый ГОСТ Р 52727–2007, рекомендуют использовать резонансные ПАЭ (преобразователи АЭ). И хотя по требованиям РД 03-299–99 полоса анализа таких АЭ систем должна быть от 20...1000 кГц ни одна из них не производит в указанном диапазоне полноценный анализ свойств сигналов АЭ, лишь по-

зволяя перемещаться по диапазону за счет изменения частоты резонанса ПАЭ и соответствующей фильтрации. Это объясняется отсутствием жестких требований нормативных документов, дающих широкую свободу для творчества разработчиков и исследователей. Само по себе это не так уж и плохо, но на практике приводит к нивелированию понятий и отсутствию метрологии.

Автору известны лишь три многоканальные АЭ системы, однозначно ориентированные на анализ сигналов АЭ и широкой полосе частот. Это АЭ системы семейства «ЭМИС» (г. Хабаровск), «КАЭМС» (г. Санкт-Петербург) и «СДС» (г. Москва). Все остальные АЭ системы позволяют лишь в той или иной мере использовать широкополосные ПАЭ, включая выборочный анализ частотного спектра. Но все эти функции у них не достаточно развиты и не являются основными.

АЭ системы «ЭМИС» (рис. 1) отличаются тем, что при высокой помехоустойчивости позволяют с высокой точностью анализировать временное и пространственное распределение энергии и оперативно принимать решения. При этом входной сигнал отбраковывается по ряду идентифицирующих признаков, а при принятии решения используются два браковочных уровня. Каждый идентифицированный входной сигнал, включая его предысторию и послезвучание, а также все текущие характеристики, сохраняются в файл и в дальнейшем могут быть использованы для документирования и обоснования. Такая методика подразумевает обширную постобработку.

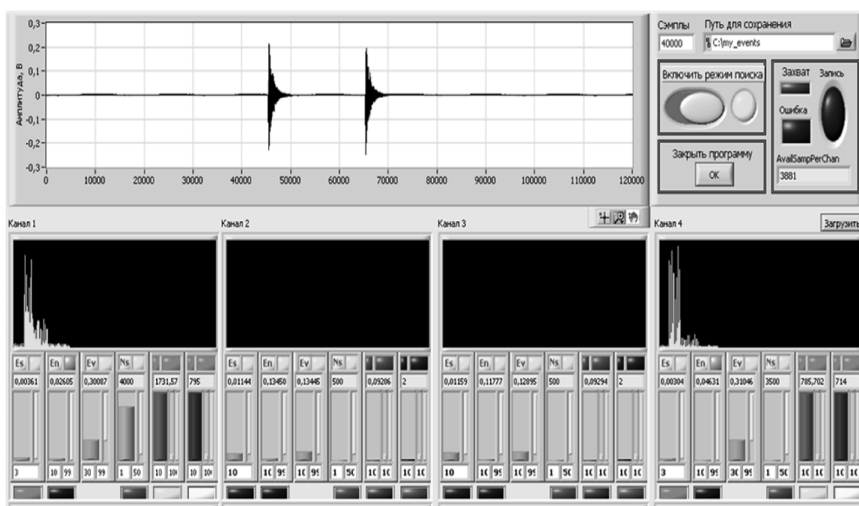


Рис. 1. Фрагмент интерфейса лицевой панели АЭ-системы «EMIS – 4/16 DAQ»

Литература

1. **Незрушающий** контроль: Справочник / Под общ. ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. Т. 7: В 2 кн. Кн. 1: Иванов В.И., Власов И.Э. Метод акустической эмиссии. М.: Машиностроение, 2006. 829 с.: ил.
2. **Овчарук В.Н.** Акустико-эмиссионные методы исследования свойств керамических материалов / В. Н. Овчарук. Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2010. 201 с.
3. **Горбунов А.И., Лыков Ю.И., Овчарук В.Н.** Спектральные характеристики акустических сигналов при усталостных испытаниях образцов // Дефектоскопия. 1985. № 10. С. 81 – 85.

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ

Параев С.А.¹, Бутусов О.Б.², Волкова Е.Э.²

¹ОАО «НИИХиммаш», Москва, Россия; ²МАМИ, Москва, Россия

Вейвлет – преобразование (или анализ) называют «математическим микроскопом» для точного изучения внутреннего состава и структур неоднородных источников информации: сигналов и функций и др. Его используют во многих областях науки и техники для решения самых различных задач: распознавания образов, численного моделирования динамики сложных нелинейных процессов, анализа аппаратной информации и изображений в медицине, космической технике, астрономии, геофизике, для эффективного сжатия сигналов и передачи информации по каналам с ограниченной пропускной способностью и т.п.

В данной работе приведены результаты применения программы обработки данных акустико-эмиссионного контроля с использованием математической модели вейвлет-преобразования. Программа написана на кафедре прикладной математики МАМИ с использованием программного пакета MATLAB. Контроль проводился в условиях наличия эксплуатационных шумов различного уровня.

По полученным в работе результатам сделаны следующие выводы.

1. Применение вейвлет-анализа позволяет эффективно очищать источники АЭ от шума и, в перспективе, может заменить амплитудный метод отстройки от шумов. В этом случае, даже при наличии шумов будет сохраняться информация о слабых источниках АЭ, что важно для контроля объектов с низким уровнем акустико-эмиссионной активности.
2. Очистка данных от шумов методом вейвлет-анализа позволяет уточнить характеристики источников АЭ (время прихода, длительность, энергия и др.), их координаты и, таким образом, повысить качества акустико-эмиссионного контроля.

ПРИМЕНЕНИЕ САМООБУЧАЮЩИХСЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ

Параев С.А.¹, Бутусов О.Б.², Волкова Е.Э.²
¹ОАО «НИИХиммаш», Москва, Россия; ²МАМИ, Москва, Россия

В настоящее время нейронные сети являются одним из приоритетных направлений исследований в области искусственного интеллекта, решения задач классификации, прогнозирования, автоматизации процессов распознавания образов, организации ассоциативной памяти и т.д.

В работе приведены результаты классификация источников акустической эмиссии с помощью математической модели на основе самообучающихся нейронных сетей с учителем (LVQ-сети), разработанной на кафедре прикладной математики МАМИ. В компьютерной модели использовались встроенные функции системы MATLAB 7. Проведена классификация степени опасности источников АЭ по четырем классам: пассивный, активный, критически-активный, катастрофически-активный. Программа апробирована на экспериментальных данных, полученных на образцах и моделях с источниками АЭ разного класса.

Выводы.

1. Нейронные сети векторного квантования, использующие обучение с учителем (LVQ-сети), позволяют классифицировать источники акустической эмиссии по всем классам опасности.

2. Нейронная сеть LVQ, обученная на ограниченном множестве данных, способна обобщать полученную информацию и показывать хорошие результаты классификации на новых данных, не использовавшихся в процессе обучения.

ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ДАННЫХ АЭ МОНИТОРИНГА В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ШУМОВ

Петерсен Т.Б., Шемякин В.В., Черниговский В.Ю.
ООО «ДИАПАК», Москва, Россия

Обработка данных акустической эмиссии при осуществлении непрерывного АЭ мониторинга опасных объектов имеет свои особенности по сравнению с периодическим контролем. В частности, наличие рабочих шумов оборудования, маскирующих сигналы от развивающихся дефектов/течи, возможность ошибочной интерпретации кластеров помех как реальных опасных источников, а также сложность или даже невозможность своевременно подтвердить результаты контроля альтернативными методами, приводят к необходимости развития новых подходов к анализу и ин-

терпретации АЭ данных и повышают требования к достоверности результатов. С другой стороны, положительным фактором мониторинга является полнота регистрируемой информации и большая статистика данных.

Предметом настоящего исследования является анализ возможностей и рассмотрение различных способов анализа данных, полученных при АЭ мониторинге объектов полипропиленового производства.

Основные задачи включали изучение эксплуатационных шумов объектов с целью дальнейшего использования информации для правильной интерпретации АЭ данных; выбор оптимальных параметров регистрации для снижения уровня А-порога и увеличения чувствительности АЭ метода; оценка возможности диагностики состояния объекта по шумам.

Объектом исследования служит химический реактор, оснащенный перемешивающим устройством, в котором протекает непрерывный процесс полимеризации пропилена и образования твердых частиц порошка полипропилена. Предлагаемый комплексный подход к анализу АЭ данных заключается в совместном использовании и обработке всей регистрирующейся информации, включая низкочастотный шум (в системах РАС – это среднеквадратическое значение шума, RMS), полученный путем временно-прореживания и осреднения оцифрованных данных с выхода АЦП; потоки АЭ сигналов и отдельные сигналы; волновые формы АЭ сигналов.

Исследования, проведенные на работающем реакторе, показали, что основной шум реактора создается соударением между собой и о стенки реактора массы твердых частиц пропиленового порошка, перемешиваемого мешалкой. Анализ формы сигналов шума показал, что в полосе частот от 100 до 800 кГц шум может рассматриваться как широкополосный «цветной» шум, характеризующийся степенной зависимостью амплитуды, A от частоты, f : $A \sim 1/f^n$, с показателем $n \sim 3$.

С учетом полученной частотной зависимости спектральной плотности мощности шума был определен оптимальный частотный диапазон приемного тракта (оптимизация по соотношению чувствительности метода и величине затухания сигналов), позволивший на 12 дБ снизить порог дискриминации по амплитуде и, соответственно повысить чувствительность АЭ метода контроля.

Анализ среднеквадратического значения (RMS) эксплуатационного шума показал, что высокочастотный шум модулируется низкими частотами, кратными частоте вращения мешалки ($F_m = 15$ об/мин = 0,25 Гц), а именно, 0,5 Гц; 1 Гц; 2 Гц. Модуляция высокочастотного шума определяется наличием вынужденной периодической вращающей силы и нелинейным характером взаимодействия этой силы с процессами соударения частиц. Несмотря на применение низкочастотной фильтрации при регистрации (частота среза 100 кГц), низкие частоты модуляции можно определять по пикам в частотной области, произведя преобразование Фурье выборки шума, рис. 1. При этом на спектрах оцифрованного сигнала и

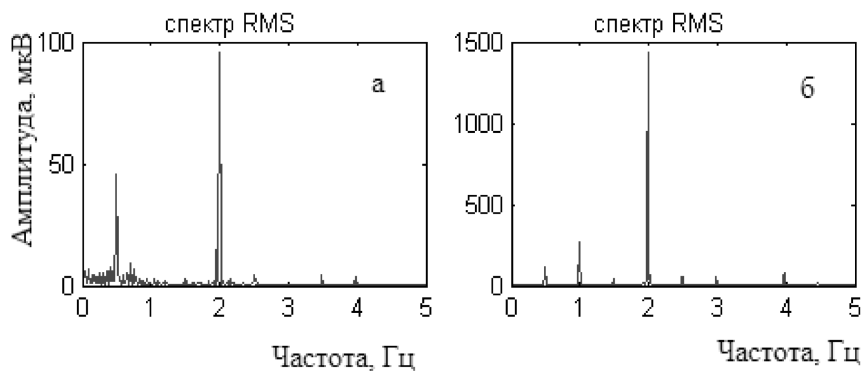


Рис. 1. Спектральные характеристики среднеквадратического значения шума, полученные на различных участках объекта

сигнала-стриминга (потокowego оцифрованного сигнала, записанного непрерывно в течение нескольких секунд с частотой дискретизации 1 МГц) на упомянутых частотах резонансы отсутствуют, что объясняется природой осуществления низкочастотного модулирования высокочастотных сигналов и подчеркивает важность проведения рассматриваемого анализа.

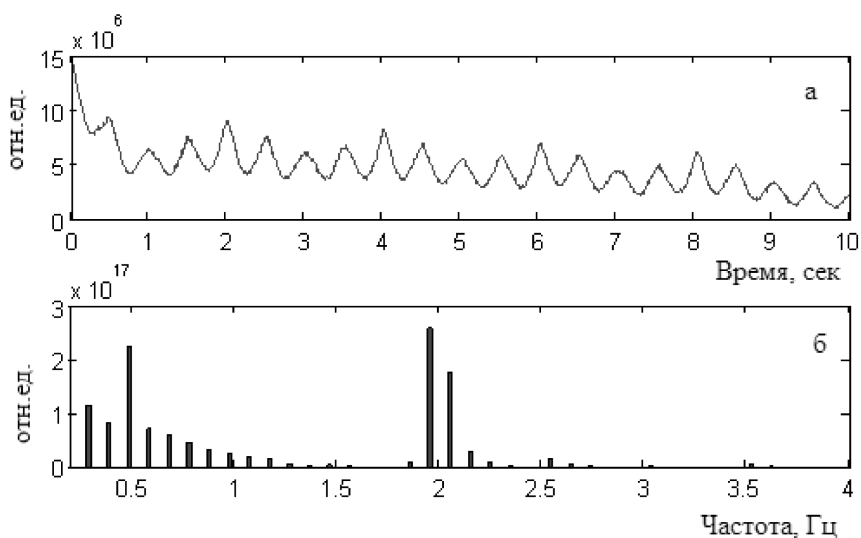


Рис. 2. Квази автокорреляционная функция последовательности хитов (а) и ее Фурье-преобразование, свидетельствующие о наличии резонансных частот (б)

Исследование RMS в области частот от 10...50 Гц показал наличие пика на частоте 25 Гц, соответствующего вибрации на частоте вращения насоса компрессора рециркулирующего газа.

Кроме того, показано, что поиск периодически повторяющихся процессов и их частотный анализ может проводиться исключительно на базе информации об АЭ сигналах (хитах). На рисунке 2 приведена квази автокорреляционная функция, полученная специальным способом на базе последовательности сигналов. Спектральный анализ функции свидетельствует о присутствии резонансов на тех же частотах, которые были получены в результате анализа RMS, что свидетельствует об эффективности анализа потока хитов.

Установлено, что сигнал от имитатора Су-Нильсена с легкостью распознается, если его амплитуда превышает порог на 10...15 дБ, или когда источник сигналов располагается вблизи датчика.

Выводы

Исследованы спектральные особенности шума реактора, в частности, их связь с частотами возбуждающих сил и нелинейными резонансными явлениями. Продемонстрирована возможность осуществления диагностики работоспособности объекта и механизмов средствами АЭ контроля/мониторинга по акустическим шумам. В частности, показано, что анализ АЭ шума (RMS) в принципе позволяет диагностировать такие возможные неполадки, как выход из строя насоса; компрессора рециркулирующего газа; утечка пропилена; образование агломератов полипропилена в слое порошка в реакторе и в куполах реактора.

СИСТЕМА ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ПРИГОДНОСТИ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ИНВАРИАНТОВ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Попов А.В.

Военная академия ВВС, г. Воронеж, Россия

Разработана совокупность научно-обоснованных технических и технологических решений по созданию системы оценки эксплуатационной пригодности силовых элементов конструкций методом акустической эмиссии, обеспечивающая повышение эффективности оценки эксплуатационной пригодности конструкций.

Применительно к проблематике исследований результативно использованы:

1. Разработанная система оценки эксплуатационной пригодности конструкций включающая в себя технически реализованные способы и аппаратурно-методическое обеспечение метода акустической эмиссии, отличающаяся использованием инвариантов акустико-эмиссионных процессов для оценки процессов накопления повреждений в силовых элементах конструкций.

2. Предложенные способы оценки накопления повреждений конструкций основанные на анализе акустико-эмиссионных процессов при деформировании конструкций, отличающиеся тем, что изменение вида и характеристик распределений параметров акустической эмиссии оценивается при помощи инвариантов – безразмерных математических соотношений характеризующих законы распределения случайных процессов [1 – 4].

3. Разработанный акустический способ оценки эксплуатационной пригодности топливных емкостей, отличающийся тем, что при проведении акустико-эмиссионного контроля нагружение конструкций производится не эксплуатационной или избыточной нагрузкой, а вынужденными колебаниями на резонансных частотах конструкции [5].

4. Разработанный бесконтактный способ регистрации малых перемещений поверхности конструкций при деформировании и калибровки акустико-эмиссионной аппаратуры на основе лазерного многолучевого интерферометра, отличающийся использованием в схеме интерферометра объемной отражательной голограммы позволяет осуществлять широкополосную регистрацию импульсов акустической эмиссии с удаленных и опасных объектов, не допускающих крепление датчиков и подготовку поверхности к контролю [6 – 8].

5. Предложенная модель переноса результатов прочностных испытаний образцов на силовые элементы конструкции, отличающаяся тем, что подобие компонентов напряженно-деформированного состояния в исследуемой области образца и конструкции из одного материала определяется по информативным параметрам акустико-эмиссионных процессов [9].

6. Разработанная экспериментальная методика прогнозирования сроков эксплуатации силовых элементов конструкций, отличающаяся тем, что расход ресурса конструкции определяется по числу и интенсивности импульсов акустической эмиссии [10].

7. Разработанные опытные образцы многоканальных аппаратно-программных комплексов оценки эксплуатационной пригодности силовых элементов конструкций, отличающиеся тем, что позволяют осуществлять: многоканальную оценку информативных параметров акустико-эмиссионных процессов, действующих нагрузок и деформаций; видеорегистрацию процесса испытаний и показаний аналоговых приборов; создание баз данных; постобработку, сравнение и документирование результатов испытаний.

8. Выявленные закономерности накопления повреждений в силовых элементах основанные на экспериментальных данных о связи значений информативных параметров акустико-эмиссионных процессов с параметрами нагрузки и деформации позволяют оперативно оценивать действительные значения прочностных характеристик и эксплуатационную пригодность конструкций [11, 12].

Автором разработаны:

1) система оценки эксплуатационной пригодности силовых элементов конструкций методом акустической эмиссии, обеспечивающая повышение на 15...20 % эффективности оценки эксплуатационной пригодности конструкций;

2) способы оценки акустико-эмиссионных процессов на основе инвариантов позволяющие идентифицировать стадии разрушения и обеспечивающие оперативность и достоверность оценки эксплуатационной пригодности силовых элементов конструкций;

3) акустический способ оценки эксплуатационной пригодности конструкций на основе комбинации акустико-эмиссионного метода и метода вынужденных колебаний позволяющий оперативно определять наличие и местоположение дефектов в тонкостенных оболочках без нагружения эксплуатационной или избыточной нагрузкой;

4) способ бесконтактной регистрации малых перемещений поверхности конструкций при деформировании на основе лазерного голографического интерферометра обеспечивающий достоверность регистрации акустико-эмиссионных сигналов и калибровку акустико-эмиссионной аппаратуры;

5) акустико-эмиссионные модели переноса результатов прочностных испытаний образцов на силовые элементы конструкции обеспечивающие: изучение процессов разрушения конструкций на образцах, сокращение количества испытаний реальных конструкций, формирование базы данных по результатам испытаний конструкционных материалов;

6) экспериментальная методика прогнозирования сроков эксплуатации силовых элементов на основе метода акустической эмиссии, позволяющая оценивать ресурс конструкций вне зависимости от величины и последовательности прикладываемых нагрузок;

7) требования к разработке и опытные образцы многоканальных аппаратно-программных комплексов позволяющие оперативно оценивать эксплуатационную пригодность силовых элементов конструкций;

8) экспериментальные данные о закономерностях процессов накопления повреждений в конструкционных материалах и элементах конструкций позволившие сделать выводы: о возможности продления сроков эксплуатации емкостей для долговременного хранения топлива; о возможности продления сроков эксплуатации агрегатов и систем наземного оборудования комплексов; о том, что характерные для начала трещинообразования

в силовых элементах сигналы акустической эмиссии возникают на уровне 60...80 % от предельной разрушающей нагрузки, что позволяет получать новые расчетные значения прочностных характеристик и оценивать возможность эксплуатации конструкций; о повышении эффективности оценки эксплуатационной пригодности конструкций при использовании разработанной системы, включающей способы и аппаратурно-методическое обеспечение метода акустической эмиссии.

Литература

1. **Расщепляев Ю.С., Попов А.В.** Метод инвариантов в задаче исследования потоков акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2000. № 10. С. 79 – 82.
2. **Попов А.В.** Способ оценки процессов разрушения конструкций при акустико-эмиссионном контроле: пат. 2233444 Российская Федерация. 2004. Бюл. № 21. 5 с.
3. **Попов А.В., Кондранин Е.А.** Способ оценки процессов разрушения конструкций при акустико-эмиссионном контроле: пат. 2367941 Российская Федерация. 2008. Бюл. № 17. 5 с.
4. **Попов А.В., Кондранин Е.А.** Способ оценки процессов разрушения конструкций при акустико-эмиссионном контроле: пат. 2367942 Российская Федерация. 2008. Бюл. № 26. 5 с.
5. **Попов А.В.** Акустико-эмиссионный метод вынужденных колебаний при определении дефектов в тонкостенных сосудах давления // Дефектоскопия. 2005. № 3. С. 27 – 31.
6. **Попов А.В., Прыгунов А.Г.** Голографический метод регистрации акустико-эмиссионных сигналов при деформации твердых тел // Дефектоскопия. 2000. № 6. С. 64 – 70.
7. **Попов А.В., Прыгунов А.Г.** Регистрация малых перемещений при деформации твердых тел голографическим интерферометром // Известия вузов. Приборостроение. 2001. № 2. С. 50 – 56.
8. **Попов А.В., Паринов И.А., Рожков Е.В., Трепачев В.В., Прыгунов А.Г.** Измеритель перемещений с объемной голограммой: пат. 2169348 Российская Федерация. 1998. Бюл. № 26. 4 с.
9. **Костоготов А.И., Попов А.В.** Акустико-эмиссионный метод моделирования процессов разрушения материалов // Дефектоскопия. 2002. № 10. С. 3 – 7.
10. **Попов А.В.** Акустико-эмиссионный метод оценки ресурса конструкций на основе инвариантов теории надежности // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2003. № 4. С. 118 – 122.
11. **Ильин В.А., Попов А.В., Жумай В.Э., Ильин А.А.** О прочности материала емкостей (баков) из алюминий-магниевого сплава АМг6Н // Контроль. Диагностика. 2009. № 5. С. 47 – 50.

12. **Ильин В.А., Попов А.В., Захаров А.А.** Прочность сварных соединений емкостей (баков) под давлением // Контроль. Диагностика. 2011. № 6. С. 36 – 40.

**НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ КОМПЛЕКСОВ
ИНТЕГРАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ
СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ В
ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Разуваев И.В.

ЗАО «НПО «Алькор», г. Дзержинск, Россия

В докладе описаны цели и методы создания нового поколения преобразователей акустической эмиссии, специально предназначенных для применения в составе комплексов интегрального мониторинга технического состояния оборудования опасных производственных объектов и их диагностики в процессе эксплуатации. Основные области применения – мониторинг и диагностика оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств «на режиме». Приведены сравнительные характеристики новых и традиционно применяемых преобразователей.

**ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ
ЭМИССИИ ПРИ ИСПЫТАНИИ СОСУДА РАБОТАЮЩЕГО
ПОД ДАВЛЕНИЕМ С РАССЛОЕНИЕМ СТЕНКИ**

Растегаев И.А., Виноградов А.Ю., Мерсон Д.Л., Чугунов А.В.
ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет»,

г. Тольятти, Россия

Тольяттинский участок ООО «НПФ «Промэкспертиза»,
г. Тольятти, Россия

В практике оценки промышленной безопасности опасных производственных объектов (ОПО) часто по результатам анализа технической документации или комплексного технического диагностирования выявляется наличие дефекта в обследуемой конструкции. Присутствие дефекта ставит перед экспертной организацией проблему принятия решения в пользу отбраковки, назначения ремонта или допуска объекта контроля (ОК) к эксплуатации без ремонта. Особенно затруднительно принимать решение, если отбраковка дефекта четко не регламентируется в нормативной документации, а анализ напряженно-деформированного состояния показывает, что

конструкция с дефектом сохраняет несущую способность. К таким «проблемным» дефектам относится расслоение. В данной работе речь пойдет об одном из его разновидностей – расслоения образующегося при прокате, из-за наличия в слитке металла газовых пузырей или шлаковых включений и залегающего, как правило, посередине или в пределах 1/3 подповерхностной части проката параллельно поверхности с образованием воздушного зазора.

Согласно ГОСТ Р 52727–2007 [1], ПБ 03-593–03 [2] оценка степени опасности дефекта и окончательное решение о допуске ОПО к эксплуатации может быть принято на основании результатов применения метода акустической эмиссии (АЭ), но в настоящее время нам не известны работы описывающие особенности проявления АЭ при испытании сосуда с расслоением стенки. Основанием для проведения данной работы послужили результаты технического диагностирования промежуточной емкости газофракционирующей установки (ГФУ) одного из нефтеперерабатывающих заводов, в обечайке которой было установлено присутствие нескольких областей с расслоениями.

Целью работы является создание научного задела для разработки критериев оценки степени опасности расслоений стенки сосудов, работающих под внутренним давлением по параметрам сигналов АЭ. Для достижения указанной цели требуется выполнить следующие этапы работы:

(а) – провести подробное двухстороннее ультразвуковое (УЗ) сканирование мест расслоений по сетке на частотах контроля 2,5 и 5,0 МГц с учетом рекомендаций работы [3];

(б) – провести по расчетным схемам ПНАЭ Г-7-002–86 [4] оценку прочности обечайки сосуда (на основании результатов которого объект и был допущен к гидравлическому испытанию);

(в) – провести гидравлическое испытание сосуда с применением метода АЭ, согласно ГОСТ Р 52727–2007 [1], ПБ 03-593–03 [2];

(г) – провести расчет взаимного перемещения стенки расслоения и стенки сосуда, согласно схемам ПНАЭ Г-7-002–86 [4] в соответствии с графиком нагружения сосуда при гидравлическом испытании по п. (в);

(д) – провести анализ АЭ данных и их сопоставление с результатами анализа напряженно-деформируемого состояния полученных в п. (а)...(г);

(е) – составить образ сигналов АЭ, регистрируемых от расслоений расположенных в различных местах сосуда;

(ж) – предложить подходы и критерии оценки степени опасности расслоений по сигналам АЭ.

На текущий момент выполнены этапы от (а) до (д), по результатам которых сделаны следующие промежуточные выводы. С позиции напряженно-деформированного состояния расслоение является относительно стабильным дефектом, так как при замыкании зазора напряжения в вершинах

расслоения снижаются, а стенка начинает работать как двухслойная оболочка. Таким образом, основная нагрузка в виде внутреннего давления, не способствует развитию расслоений параллельных поверхности листа, а значит, сигналы АЭ регистрируемые из зон расслоения могут быть связаны только с трением берегов стенок при замыкании зазора расслоения. Последнее подтверждается тем, что пик активности регистрации АЭ во время рабочего испытания [1, 2] приходится на давления менее рабочего ($P_{\text{раб}}$), а при давлении близком к рабочему и до испытательного ($P_{\text{исп}}$) активность АЭ снижается. Согласно расчетам такое поведение зависит, как от глубины залегания расслоения, так и от зазора его раскрытия. Чем ближе расположение расслоения к внутреннему радиусу сосуда, тем ниже вероятность его обнаружения АЭ методом, так как замыкание зазора (трение берегов расслоения) будет происходить при минимальных давлениях (в зоне предварительного испытания до $0,25P_{\text{раб}}$ или до $0,5P_{\text{раб}}$ [1, 2]). Соответственно, чем ближе расположение расслоения к внешнему радиусу сосуда, тем больше вероятность по активности АЭ его спутать с трещиной или, при достаточной жесткости внутренней стенки расслоения, не получить замыкание зазора. То же самое наблюдается и при анализе ширины раскрытия расслоения при фиксированной глубине его расположения, т.е. чем меньше зазор, тем быстрее происходит замыкание и тем меньше вероятность его обнаружения. При этом большее влияние оказывают глубина залегания расслоения и рабочее давление, определяющие соотношение нагрузка/жесткость системы. Сопоставление записи АЭ с расчетными кривыми перемещения цилиндрических оболочек с определенной долей расхождения связанных с погрешностью УЗ способа оценки залегания расслоения и упрощениями расчетной схемы показывает, что пик активности АЭ приходится на нулевые и отрицательные значения зазора. Это соответствует моменту замыкания зазора и, по-видимому, некоторому процессу «самоподгонки» неровностей расслоения в момент замыкания (при отрицательном зазоре). Согласно расчету в процессе испытания на этапе нагружения на «подтверждение эффекта Кайзера» [1, 2] не происходило раскрытия зазора расслоения, что подтверждается экспериментальными данными, как уменьшение активности регистрации АЭ при давлении, выше которого происходит замыкание зазора. Предварительная оценка степени опасности расслоения, проведенная с использованием «стандартных» подходов [2], а именно с помощью критерия Данегана-Иванова-Быкова (локально-динамического) и интегрального критерия, показала следующее. Во время замыкания зазора источник АЭ в виде расслоения соответствует III классу опасности (критически активный источник), который на больших давлениях переходит к I классу (пассивному) или вообще перестает проявляться. Кроме этого, сигналы АЭ, регистрируемые от расслоения, не соответствуют критерию непрерывной АЭ, по которому оценивается наличие течи в контро-

лируемом объекте [2], так как активность АЭ уменьшается на этапах выдержки давления во время испытания. Координаты положения расслоения на локационной карте совпали с результатами УЗ измерений, при этом эллипс рассеивания локационных событий, построенный с доверительной вероятностью 0,95, оказывается меньше площади расслоения определенной УЗ способом с сохранением преимущественного направления, что требует дополнительного анализа.

Таким образом, на основе вышеизложенного, можно утверждать, что существует реальная возможность выявления и оценки степени опасности расслоений с помощью метода АЭ, для реализации которой необходимо выполнить работу по этапам (е) и (ж).

Работа выполняется при финансовой поддержке гранта Правительства РФ ГК № 11.G34.31.0031 и темы госзадания № 7.1925.2011.

Литература

1. **ГОСТ Р 52727–2007.** Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2007.

2. **ПБ 03-593–03.** Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. М.: Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2003.

3. **Комаров А.В.** Оценка работоспособности нефтегазопроводов с внутренними расслоениями стенок труб / А.В. Комаров. Дис. ... канд. техн. наук. УГТУ. Ухта, 2012. 161 с.

4. **ПНАЭ Г-7-002–86.** Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1989.

СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ С ПРИОРИТЕТОМ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ

Савельев В.Н.¹, Савельев Д.В.², Тишкин А.П.²

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,

²ООО «Прадиком», Санкт-Петербург, Россия

Основной задачей обеспечения безопасной эксплуатации технологического оборудования опасных производственных объектов при техническом диагностировании, в том числе и при экспертизе промышленной

безопасности, является выявление развивающихся при эксплуатационных нагрузках дефектов типа трещин. Традиционные технологии технического диагностирования, в которых рекомендуется использовать для контроля по возможности максимальное количество различных методов НК, с целью выявления недопустимых дефектов, превышающих браковочные уровни, нельзя признать эффективными. Даже наличие крупных дефектов, «заложённых» при изготовлении или монтаже оборудования и трубопроводов и выявляемых традиционными методами НК, не является в общем случае основанием для выбраковки изделий после их эксплуатации в течение длительного срока (более 20 – 30 лет). Такая схема диагностики зачастую приводит лишь к неоправданному выбраковыванию оборудования и трубопроводов, в то же время, пропуская недопустимые дефекты, расположенные в недоступных для применяемого метода НК местах объекта. Поэтому АЭ контроль используется в качестве определяющего для выработки критериев допуска в эксплуатацию оборудования и трубопроводов с обнаруженными дефектами, обеспечивая при этом необходимый уровень безопасности и время их работы.

Для оценки технического состояния производственных объектов была разработана новая технология применения АЭ контроля при испытаниях в эксплуатационном режиме при давлениях, не превышающих рабочие значения, она рекомендована к применению в ОАО «Газпром» и включена в методики технического диагностирования оборудования и трубопроводов ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез». Эффективность ее применения показана, например, на компрессорных станциях ОАО «Газпром», где наряду с выявленными недопустимыми дефектами в оборудовании и трубопроводах, АЭ контроль позволил продлить срок безопасной эксплуатации 28 сосудов, работающих под давлением (СРПД), и более 300 аппаратов воздушного охлаждения (АВО) газа, выбракованных традиционными методами НК (1994 – 2013 гг.). Можно отметить что, если при техническом диагностировании СРПД АЭ контроль применять более широко, то аналогично АВО газа выбраковка СРПД может быть значительно уменьшена.

Рекомендуется более широко применять технологию диагностики сосудов, аппаратов и трубопроводов, в которой АЭ контроль, совмещенный с испытаниями технологической рабочей средой (при давлениях, не превышающих рабочих значений), является основным методом НК. Традиционные методы НК в этом случае служат лишь для создания адекватного образа (визуализации) выявленных методом АЭ дефектов. Подобная технология диагностики оборудования и трубопроводов надежно обеспечит безопасность их дальнейшей эксплуатации, позволит научно обоснованно определять ее сроки и выбраковывать оборудование только с действительно несовместимыми с дальнейшей эксплуатацией дефектами.

ЛОКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ АЭ НА ОБЪЕКТАХ СЛОЖНОЙ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕГУЛЯРНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СЕТЕВОЙ МОДЕЛИ

Самохвалов А.Б.
ООО «ДИАПАК», Москва, Россия

Представлена пространственная сетевая модель, основанная на регулярной кубической решетке, позволяющая выполнять локацию источников АЭ на объектах сложной произвольной формы.

Локация источников АЭ обычно основывается на использовании простых геометрических моделей: плоскость, цилиндр, сфера, конус. Однако на практике такой подход не всегда дает хорошие результаты по ряду причин:

- во многих случаях объекты имеют сложную или неправильную форму, которая не сводится к элементарным геометрическим фигурам;
- наличие внутренних устройств или среды;
- неоднородность материала;
- сложный характер распространения звуковых волн.

В связи с этим применение простой геометрической схемы локации нередко приводит к получению хаотичной картины расположения источников АЭ («звездного неба»).

Для повышения адекватности идентификации источников АЭ на реальных объектах, помимо простых схем, применяются также пространственные сетевые модели, т.е. такие, в которых форма объекта представляется трехмерной пространственной сеткой. Пространственные сетки позволяют учесть различные детали геометрической формы и конструкции объекта, а также его рабочие условия. Существуют различные способы построения сетевых пространственных моделей, применяемые в соответствующих алгоритмах локации. Эти способы основаны на таких подходах, как вычисление кратчайшего пути по поверхности (геодезической линии), томография и др. [1 – 3]. Различие между способами заключается, главным образом, в методах задания узлов модели, связей между ними и вычисления путей распространения звуковых волн.

В настоящей работе рассматривается способ локации источников АЭ на объектах сложной формы с использованием специально разработанной сетевой модели с регулярным пространственным расположением узлов. Геометрическая форма объекта моделируется при помощи регулярной пространственной сетки, построенной из одинаковых кубических ячеек. Хотя такая модель является более грубой, чем модель, основанная на кривых поверхностях, она, тем не менее, обеспечивает точность локации, достаточную для большинства практических применений; в то же время, пре-

имуществами этой модели являются относительная простота, универсальность и высокая скорость вычислений.

Узлами модели являются центры кубических ячеек, а сама кубическая ячейка ограничивает зону влияния соответствующего узла. Реальный объект, в общем случае состоящий из криволинейных пластин и объемных фигур, представляется в модели группами смежных ячеек. Ребрами сетки (графа) являются линии, соединяющие центры соседних ячеек. Каждый узел связан со всеми заполненными смежными узлами (ячейками), которых может быть максимум 26. Кроме этого, дополнительно вводятся ребра, соединяющие узел с ячейками во втором смежном слое, если заняты промежуточные ячейки (рис. 1, а, б). Дополнительные ребра обеспечивают сглаживание путей распространения звука и более полное их соответствие реальной форме объекта.

Предполагается, что события возникают в узлах, и затем акустические волны распространяются по другим узлам модели, достигая узлов, в которых расположены датчики. Датчики считаются расположенными в ячейках, соответствующих их точному фактическому положению во время испытания.

Основной задачей при расчете модели является формирование таблицы кратчайших расстояний от всех узлов – потенциальных источников АЭ, до узлов-датчиков. Эта таблица затем используется для выполнения локализации. По таблице определяются отклики на датчиках при распространении волны, состоящей из одной или нескольких мод. Для более сложных случаев, где в одной модели присутствуют одновременно материалы с различными свойствами (разными скоростями звука и функциями затухания), вместо заранее рассчитываемой таблицы расстояний применяется симуляция событий АЭ.

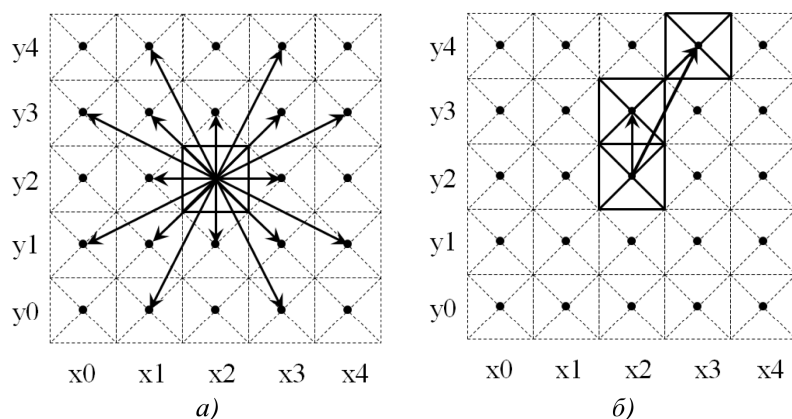


Рис. 1. Схема распространения звука по узлам сетки:

а – принципиально достижимые ячейки;

б – условие применения сокращенного пути ко второму смежному слою

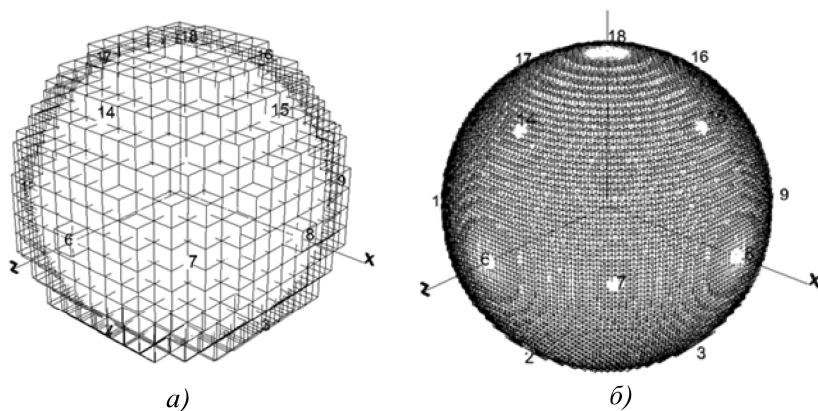


Рис. 2. Модель сферического сосуда диаметром 14,0 м:
a – размер ячейки 1,0 м, 786 ячеек в модели;
б – размер ячейки 0,2 м, 21288 ячеек в модели

При выборе размера ячейки следует исходить из рационального уровня детализации. Слишком большой размер ячейки делает модель неудобной для визуального восприятия (рис. 2, *a*), тогда как слишком мелкий размер ячеек увеличивает объем вычислений без существенного увеличения точности локации, лимитированной другими факторами. В применяемых нами на практике моделях обычно содержится от 20 000 до 100 000 ячеек (рис. 2, *б*, 3).

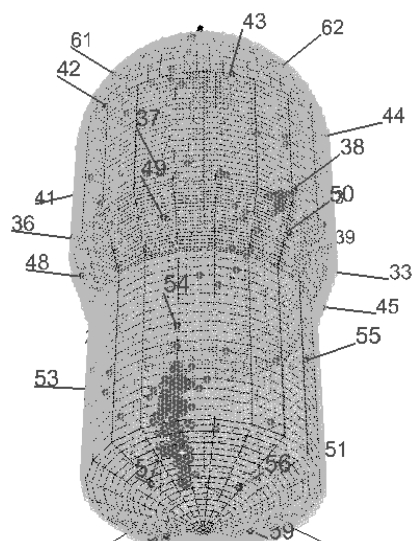


Рис. 3. Результаты локации на сосуда сложной формы

Предложенная методика применима не только к тонкостенным сосудам, наполненным газом, но и массивным пространственным конструкциям, многослойным конструкциям с различными свойствами слоев и/или структурных элементов, а также к резервуарам, наполненным жидкостью.

Для предложенной методики имеется программная реализация, апробированная как в лабораторных условиях, так и при обработке данных АЭ-контроля производственных объектов нефтеперерабатывающей и химической промышленности.

Литература

1. **Prasanna G., Bhat M.R., Murthy C.R.L.** Acoustic Emission Source Location on an Arbitrary Surface by Geodesic Curve Evolution. *Journal of Acoustic Emission*. 2007. Vol. 25. P. 224 – 230.

2. **Kus V., Zavesky M., Prevorsky Z.** Acoustic Emission Defects Localized by Means of Geodetic Iterative Procedure – Algorithms, Tests, AE Experiment. 30th European Conference on Acoustic Emission Testing, 7th International Conference on Acoustic Emission. 12 – 15 September 2012. *Proceedings*. P. 536 – 547.

3. **Zhang M.G., Cheng B.J., Li X.F., Wang M.Y.** A Fast Algorithm of the Shortest Path Ray Tracing, *Chinese Journal of Geophysics*, 2006. Vol. 49. No. 5. P. 1315 – 1323.

АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ НАКОПЛЕНИЯ РАССЕЯННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ СЛОИСТОГО УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Северов П.Б.¹, Васильев И. Е.¹, Матвиенко Ю.Г.¹,
Иванов В.И.², Панков А.В.³

¹ФГБУН Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН,
Москва, Россия;

²ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность»,
Москва, Россия;

³ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт
имени проф. Н.Е. Жуковского», г. Жуковский, Россия

Для исследования процессов деградации материалов, образования и развития дефектов в реальном времени активно используется метод акустической эмиссии (АЭ). В твердом теле при образовании и развитии дефектов на микро-, мезо- и макроуровне генерируются, как правило, импульсные сигналы. В данной работе приведены результаты исследования деформации и разрушения образцов из слоистого углепластика при квазистатическом одноосном растяжении с постоянной скоростью нагружения.

В эксперименте применялось оборудование и программное обеспечение, позволяющие в процессе нагружения определять время возникновения акустических импульсов (АИ). Диапазон амплитуд регистрируемых сигналов АЭ задавался в пределах от 45 до 100 дБ. Нижний предел определялся уровнем шума испытательной машины, верхний – пропускной способностью измерительных каналов прибора АЭ. Физическая природа источников сигналов АЭ (разрушение матрицы, дробление волокон, отслоение их от матрицы и др.) не уточнялась.

Использовалось квазистатическое нагружение с постоянной скоростью перемещения плунжера 4,0 мкм/сек образцов длиной 300 мм из многослойного углепластика с типовой симметричной укладкой $[0^{\circ}/0^{\circ}/\pm 45_2^{\circ}/0_2^{\circ}/90^{\circ}/0_2^{\circ}/\pm 45_2^{\circ}/0^{\circ}]_s$, прямоугольного поперечного сечения 50×6,03 мм с центральными отверстиями Ø14 мм. Направление вырезки образцов вдоль 0°. Образцы доведены до разрушения по центральным отверстиям.

По результатам исследований поведения образцов из композиционных материалов установлено: Накопление энергии акустических импульсов в зависимости от достигнутого уровня напряжений является базовой характеристикой для исследования процессов повреждаемости материала. Выявлены линейный и нелинейный участки характеристик накопления энергии акустических импульсов в зависимости от напряжения. Установлено подобие интегральных характеристик накопления энергии акустических импульсов в зависимости от напряжения при подобии диаграмм нагружения. На линейном участке диаграмм нагружения регистрируется равномерное нарастание энергии АЭ, что свидетельствует об относительно равномерном накоплении повреждений в объеме материала. Переход к нелинейному участку – начало локализации повреждений в зонах концентрации напряжений.

Характеристики накопления энергии акустических импульсов в зависимости от напряжения подобны при подобии диаграмм нагружения. При управлении перемещением плунжера возможно сравнение процессов накопления повреждений материала на базовой диаграмме нагружения одного из образцов. Показано, что максимальная достоверность анализа накопления рассеянных повреждений материала при обработке массива акустических импульсов связана, преимущественно, с анализом энергии акустической эмиссии.

Выявленная стадийность накопления повреждений позволяет осуществить предсказание наступающего разрушения. Акустическая эмиссия при повторных нагружениях возобновляется при номинальных напряжениях, несколько меньших по отношению к уровню ранее достигнутого максимального напряжения. Параметры этого эффекта содержат информацию о свойствах и состоянии композиционных материалов.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ОДНООСНОМ НАГРУЖЕНИИ ТИТАНОВЫХ ОБРАЗЦОВ С ЦЕЛЬЮ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА РАСКРОЯ

Физулаков Р.А., Муравьев В.И.
*ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный
технический университет»,
г. Комсомольск-на-Амуре, Россия*

Одним из перспективных направлений является газолазерная резка (ГЛР) листового титана с использованием, в качестве вспомогательного газа, азота. Использование технологии ГЛР при раскросе титановых сплавов имеет ограничение из-за наличия зоны термического влияния ухудшающей некоторые свойства получаемых деталей в целом. Особенно сильное влияние оказывается на долговечность деталей после ГЛР. Качество ГЛР характеризуется шероховатостью поверхности реза и глубиной зоны термического влияния.

В данном объеме работ исследовалось кинетика разрушения образцов в процессе одноосного растяжения. Образцы изготавливались путем ГЛР, который проводился на установке фирмы BYSTRONIC – BYSTAR 3015. Основными параметрами ГЛР в данном случае определены: использование азота в качестве вспомогательного газа; мощность излучения лазера (100 % ~ 1800 Вт) и скорость раскроя (варьировалась по четырем значениям). Скорость раскроя имеет определяющее значение для получения наилучшего качества раскроя материала.

В качестве материала использовались листовые титановые заготовки BT20 толщиной 2 мм, а скорости ГЛР изменяли от 2500 до 4000 мм/мин с шагом 500 мм/мин, здесь 2500 мм/мин – скорость раскроя титановых заготовок 2 мм, приведенная в технических рекомендациях по установке BYSTAR 3015. Изготовление образцов с различными скоростями ГЛР применялось для сравнения кинетики их разрушения. Кроме того, из этого же материала были изготовлены образцы путем фрезерования и электроэрозивной обработки. Каждая группа образцов была испытана с применением метода акустической эмиссии (АЭ). Одноосное растяжение проводилось на испытательной машине ИМАШ 20-75 «АЛА-ТОО» со скоростью 77 мм/с. Одновременно с записью диаграммы нагружения регистрировались сигналы АЭ.

Использование метода акустической эмиссии для исследования физико-механических свойств зоны реза позволяет сделать следующие выводы.

1. Фрезерованные образцы обладают низкой акустической активностью, а количество событий ГЛР и ЭЭР примерно одинаковое. Однако суммарная энергия (накопление энергии) у образцов после ГЛР значительно выше, чем у прочих. Это говорит о наличии большего количества внутренних (термических напряжений) в ГЛР образцах.

2. При раскрое с различными скоростями резания видно, что образцы малой скоростью резания дают меньшее кол-во событий (элементарное излучение энергии), но в то же время суммарная энергия таких событий больше чем у образцов, раскroенных на больших скоростях, что свидетельствует о наличии более опасных фаз в зоне термического влияния.

3. При сравнении различных способов раскроя (испытание на растяжение) оказалось, что фрезерованные образцы обладают низкой акустической активностью, а количество событий ГЛР и ЭЭР примерно одинаковое. Однако суммарная энергия (накопление энергии) у образцов после ГЛР значительно выше, чем у прочих. Что опять же говорит о наличии большего кол-ва внутренних (термических напряжений) в ГЛР образцах.

4. Методом акустической эмиссии можно контролировать качество реза с целью отработки оптимальных режимов ГЛР.

КОНТРОЛЬ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Фролов А.В., Муравьев В.И., Пицык В.С.
*ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный
технический университет»,
г. Комсомольск-на-Амуре, Россия*

Как известно, технологии термической обработки базируются на сведениях о температурах полиморфных превращений и их кинетики. При этом существует ряд эффектов на границе фазовых переходов, связанных с ослаблением энергии межатомных связей, позволяющих значительно повышать механические свойства сталей и сплавов. Но их эффективность связана со строго дозированной выдержкой материала в условиях фазового превращения. В связи с чем для использования этих эффектов в практике необходим метод точного оперативного контроля фазовых превращений.

Метод акустической эмиссии (АЭ), в отличие от большинства существующих методов контроля полиморфных переходов, позволяет проводить исследования в реальном времени, непосредственно на обрабатываемой детали без ограничений по ее форме и размерам в широком диапазоне температур и скоростей термической обработки. Но вопрос применения АЭ метода для исследования высокотемпературных полиморфных превращений в настоящее время остается открытым, а указанные исследования – малоизученными.

В ходе исследований авторами обнаружено, что во время нагрева и охлаждения стали последняя активно излучает сигналы АЭ, источниками которых служат процессы перемещения дислокаций под действием термических напряжений 1-го и 2-го рода, в результате снижения энергии потен-

циальных барьеров, тормозящих перемещение дислокаций; а также процессы распада и зарождения зерен старой и новой фаз, перемещения межфазной границы и др. При этом физико-механические характеристики материала (плотность, модули упругости, сдвига и т.д.) определяют акустические характеристики металла – скорость распространения звука и коэффициент его поглощения. Важно, что указанные акустические параметры также зависят и от частоты звука. Поэтому разные структурные составляющие стали, характеризующиеся разными наборами указанных параметров, обуславливают разное искажение АЭ сигналов во время их перемещения от источника до приемника. В результате спектральный состав АЭ сигналов при нагреве и охлаждении определяется фазовым составом материала, а границы полиморфных превращений отличаются изменением спектров АЭ.

Так на рис. 1 представлена спектрограмма сигналов АЭ во время нагрева закаленной стали 45. На рисунке отчетливо видно изменение спектра сигналов вблизи 30-го импульса, 52-го и 85-го.

Спектр АЭ сигналов на начальных стадиях характеризуется двумя максимумами вблизи частот 120...160 кГц и 280...330 кГц. Эти сигналы регистрируются в температурном диапазоне, соответствующем стадии существования мартенсита с остаточным аустенитом.

Второй интервал соответствует температурному диапазону распада мартенсита и остаточного аустенита. В это время излучаются АЭ сигналы с тремя максимумами спектральной плотности: вблизи 180 кГц, в диапазоне 300...350 кГц и выше 450 кГц.

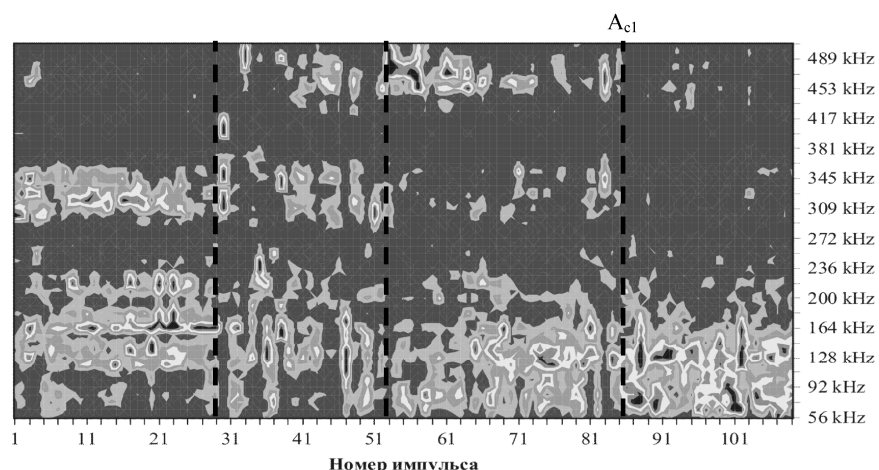


Рис. 1. Спектрограммы АЭ во время нагрева закаленной стали 45

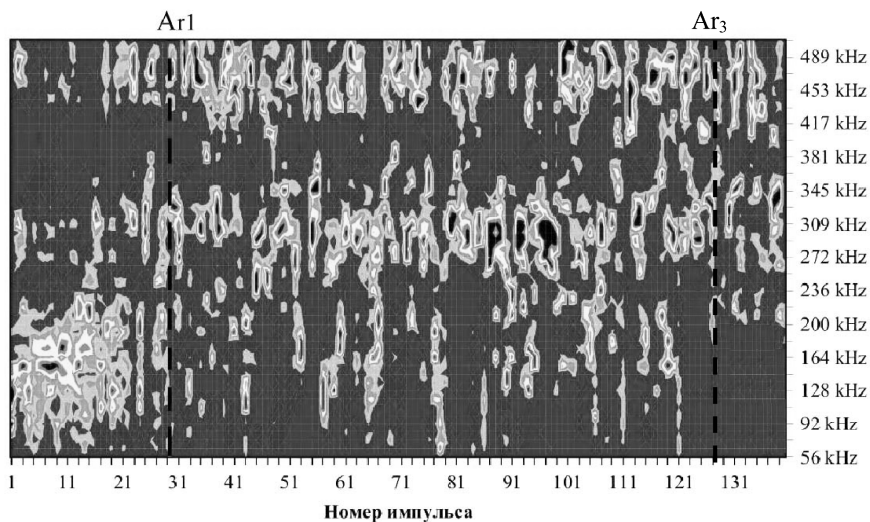


Рис. 2. Спектрограмма АЭ при охлаждении на воздухе стали 20

Во время нагрева феррито-перлитной смеси излучаются АЭ сигналы с двумя максимумами спектральной плотности: ниже 150 и выше 430 кГц.

После начала аустенитного превращения в спектре АЭ сигналов наблюдаются преимущественно низкочастотные составляющие – максимум АЭ энергии приходится на диапазон 50...170 кГц.

Во время охлаждения полиморфное превращение также сопровождается изменением спектра АЭ сигналов (рис. 2).

Таким образом, спектральный анализ АЭ сигналов во время нагрева охлаждения сталей позволяет определять тип структуры материала и границы полиморфных превращений, а АЭ метод может быть использован в качестве оперативного эффективного метода неразрушающего контроля указанных процессов.

СЕКЦИЯ 10. АНТИТЕРРОРИСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

Руководители секции: Ковалев А.В., Матвеев В.И.

ЗАЩИЩЕННОСТЬ, МОНИТОРИНГ И ДИАГНОСТИКА ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНОСТИ ТЕРРОРИСТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Ахметханов Р.С., Дубинин Е.Ф., Резников Д.И.
Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

Разработка мероприятий мониторинга и диагностического контроля является обязательной составной частью проектирования и эксплуатации опасных производственных и критически важных объектов, обеспечивающей определение текущего состояния этих объектов с целью максимального и безопасного их использования. С учетом возможности террористических воздействий для снижения рисков инициирования аварий и катастроф в состав систем защиты объектов должны быть включены системы охранной защиты и охранного мониторинга [1, 2].

Базовыми принципами построения таких систем являются: снижение рисков инициирующих воздействий; снижение рисков развития чрезвычайных ситуаций; срабатывание систем защиты и возвращение функционирующих систем на меньший уровень опасности.

Для защиты потенциально опасных объектов от инициирующих воздействий и развивающихся чрезвычайных ситуаций применяются следующие виды защит: жесткая; постоянно действующая функциональная; естественная; комбинированная; охранная [3].

Использование систем функциональной защиты позволяет в случае аварий активно воздействовать на процессы, протекающие в сложных технических системах, в частности выводить из технологической цепочки аварийные участки. Охранная защита представляет собой комплекс мероприятий по отражению террористических угроз. Снижение рисков $R(t)$, как правило, достигается применением комплекса всех перечисленных систем защиты. Система диагностики входит в состав функциональной защиты потенциально опасных объектов.

При нарастании рисков $R(t)$ до предельных значений (по сигналам, полученным от систем технической диагностики и мониторинга) необходимо принятие оперативных решений: регулирование и срабатывание систем защиты; останов процесса и объявление тревоги (рис. 1). В случае террористических воздействий основной задачей является срабатывание защиты, останов, эвакуация людей, минимизация ущербов.



Рис. 1. Управление защитой опасных объектов с учетом возможных террористических воздействий

Системы диагностики потенциально опасных объектов условно можно представить состоящими из следующих групп: встроенных систем, функционирующих при нормальной эксплуатации; встроенных систем, включаемых в работу при возникновении аварийных ситуаций и обеспечивающих срабатывание систем аварийной защиты; мобильных внеобъектовых систем диагностики предвестников тяжелых аварий или развития аварий; мобильных внеобъектовых и объектовых систем, доставляемых в зону аварий [2].

При штатной работе объекта и возможном наличии террористических угроз основной задачей является обнаружение террористических угроз, а также прогноз и упреждение развития опасных ситуаций. В этот период используются системы охранного мониторинга, физической защиты объекта и штатной диагностики.

В случае реализации террористического воздействия на объект возникает новый, непредусмотренный процесс, чаще всего разрушения, происходит развитие аварии, неконтролируемый выход опасных веществ, энергии, лавинообразное нарастание нежелательных эффектов. Основной задачей становится прекращение аварийного процесса, спасение людей, уменьшение материального ущерба. При этом используются системы аварийной защиты, штатной и аварийной диагностики и мониторинга, выявляются повреждения.

Послеаварийный период характеризуется наличием локальных очагов аварии, разрушений и пострадавших. Главной задачей является восстановление доаварийной (нормальной) ситуации, исключение возможности повторения аварии, выявление причин и условий возникновения аварии, сни-

жение последствий аварии, восстановительные работы. В этих условиях используются системы аварийной диагностики и мониторинга.

При функционировании объекта в штатном режиме контролируются характеристики его состояния: напряжения σ (деформации e), температура t , размеры, форма и места возникновения дефектов (трещин) I и др. В аварийных ситуациях контролируются также параметры поражающих воздействий: неконтролируемое высвобождение энергии E ; опасных веществ W ; нарушенные потоки информации I . При этом задача состоит в представлении информации о текущем состоянии объекта и уровне воздействия поражающих факторов P на персонал и население (N), сам объект (T) и окружающую среду (S) для оценки ситуации и принятия экстренных мер по локализации аварии (рис. 1):

$$D(t) = F_D \{W(t), E(t), I(t)\}; P(t) = F_P \{N(t), T(t), S(t)\}.$$

Здесь очень важен переход от обнаружения нештатной ситуации к определению ее вида и степени опасности, т.е. от мониторинга к диагностике.

Основными требованиями к системам мониторинга и диагностики являются:

- достаточное быстродействие (с учетом измерения, анализа и постановки диагноза);
- гарантируемые полнота обнаружения и идентификация основных потенциально опасных дефектов и отказов на ранней стадии их развития;
- минимальная вероятность ошибок;
- стойкость к воздействию поражающих факторов;
- соответствие определяющих параметров систем мониторинга и диагностики классу опасности объекта, на котором они применяются;
- минимальные затраты на систему и ее эксплуатацию.

На разных стадиях аварий и катастроф происходит поражение не только потенциально опасных объектов, но и самих систем мониторинга и диагностики, являющихся подсистемами этих объектов. Поэтому их защиту от раздельного и комплексного воздействия поражающих факторов следует рассматривать как элемент общей защиты объектов.

В системах мониторинга и диагностики основными объектами защиты являются первичные преобразователи (датчики); линии связи (передачи данных); аппаратура для регистрации и обработки информации; диагностическая информация, программное обеспечение и базы данных; операторы. Наиболее уязвимым звеном являются первичные преобразователи (датчики), поскольку они постоянно находятся в опасных технологических зонах объектов.

Методологическую базу комплексного анализа защищенности систем составляют различные способы формального описания систем защиты на основе графовых моделей с использованием показателей рисков [4], которые могут рассматриваться как интегральные показатели защищенности

системы, характеризуемой комплексом дифференцированных запасов по прочности (стойкости), надежности, ресурсу, живучести [5, 6].

Повышение защищенности систем мониторинга и диагностики обеспечивается:

1) повышением стойкости к воздействиям, ресурса, надежности, живучести элементов систем;

2) созданием дополнительных барьеров защиты, не входящих в системы, но обеспечивающих их нормальное функционирование.

Организация защиты предполагает идентификацию и анализ возможных источников угроз и факторов, способствующих их проявлению (уязвимостей). Классификацию источников угроз и их проявлений целесообразно проводить на основе анализа логической цепочки.

К системам мониторинга и диагностики применимы основные принципы обеспечения безопасности потенциально опасных объектов: эшелонированной защиты, комплексности, единичного отказа, обеспечения надежности и живучести, системный подход и другие.

Литература

1. **Махутов Н.А., Петров В.П., Ахметханов Р.С., Дубинин Е.Ф., Дворецкая Т.Н.** Особенности сценарного анализа возникновения и развития техногенных катастроф // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2007. № 3. С. 3 – 28.

2. **Махутов Н.А., Петров В.П., Ахметханов Р.С., Дубинин Е.Ф., Куксова В.И.** Выбор параметров и принципы построения систем штатной и аварийной диагностики критически важных объектов и их защиты от комплексных угроз // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2008. № 2. С. 20 – 34.

3. **Махутов Н.А., Петров В.П., Ахметханов Р.С., Дубинин Е.Ф., Дворецкая Т.Н.** Методы и моделирование процессов возникновения и развития техногенных катастроф // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2009. № 2. С. 3 – 23.

4. **Махутов Н.А., Резников Д.О.** Использование байесовских сетей для оценки террористических рисков и выбора оптимальной стратегии противодействия террористической угрозе // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2007. № 5. С. 43 – 62.

5. **Махутов Н.А., Резников Д.О., Петров В.П., Куксова В.И.** Оценка живучести сложных технических систем // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2009. № 3. С. 47 – 66.

6. **Махутов Н.А., Резников Д.О.** Сопоставительная оценка нормативного и основанного на управлении риском подходов к оценке защищенности сложных технических систем // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011. № 6. С. 92 – 98.

РАДАРЫ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ

Бажанов А.С.¹, Дутышев И.Н.¹, Марчук В.Н.¹, Местэртон А.П.¹,
Посошенко Л.З.¹, Скопин В.И.¹, Матвеев В.И.²
¹ФГУП СКБ ИРЭ РАН, г. Фрязино, Московской области;
²ЗАО НИИИИИ МНПО «Спектр», Москва, Россия

Актуальность обнаружения людей за оптически непрозрачными преградами очевидна. Она диктуется задачами, встающими перед МЧС, МВД и другими силовыми структурами: для обнаружения людей под завалами и лавинами, при спасении людей в горящих и задымленных зданиях, охране объектов, проведении антитеррористических операций, для определения местоположения людей, слежения за их перемещениями в реальном масштабе времени, контроля частоты дыхания.

Наиболее пригодны для решения этой задачи сверхширокополосные (СШП) радиолокаторы (радары). Малая длительность сигнала (единицы наносекунд) обеспечивает высокую точность определения местоположения человека за преградой и устойчивую работу радара в условиях многократных переотражений от окружающих предметов. Радар измеряет мощность отраженного от объекта сигнала, время и направление его прихода. При движении объекта появляется информация о скорости его передвижения в контролируемой зоне – доплеровское смещение частоты, пропорциональное радиальной составляющей этой скорости. Если человек неподвижен, то информация о его присутствии за преградой может быть получена контролем доплеровского смещения частоты сигнала, отраженного от грудной клетки человека при его дыхании.

На рисунке 1 изображен сигнал на выходе детектора СШП радара, который находится на расстоянии 3-х метров от кирпичной стены, имеющей толщину 50 см и обеспечивает наблюдение человека за стеной, как при его перемещении, так и в неподвижном положении – по движению грудной клетки.

Зарубежными аналогами радаров для обнаружения людей за преградами являются серийно выпускаемые радары Prism 200 (Англия, компания Cambridge Consultants), ReTWis и Radar Vision (США, фирма Time Domain), серия радаров Xaver™ 800, Xaver™ 400, Xaver™ 100 (Израиль, компания Camero-Tech Ltd) и другие. Эти радары обнаруживают людей за стенами толщиной от 20 до 60 см на расстоянии от 10 до 20 м с разрешением по расстоянию от ± 1 м до ± 15 см, по азимуту – от 120 до 30°.

В России работы по созданию радиолокаторов для обнаружения людей за преградами ведутся на ряде предприятий и фирм, таких как: Корпорация Логис, Научно-исследовательский центр Сверхширокополосных технологий МАИ, Лаборатория дистанционного зондирования МГТУ

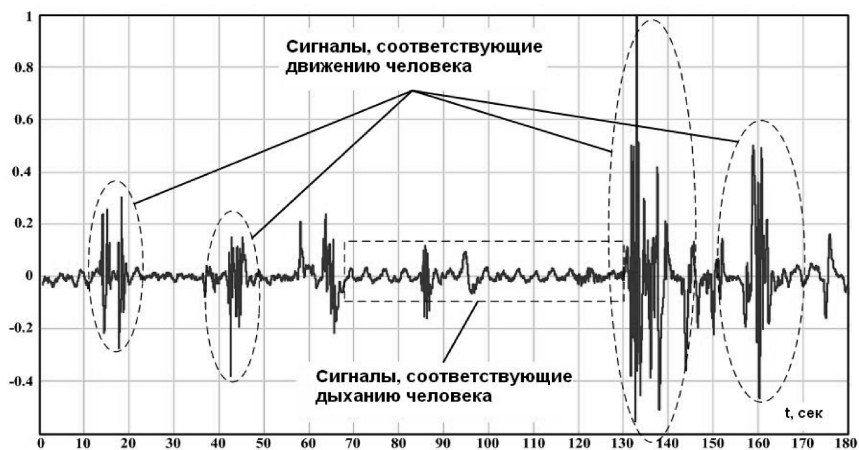


Рис. 1. Информация, содержащаяся в радиолокационном сигнале, отраженном от человека

им. Н.Э. Баумана, Научно-техническое предприятие «Тензор» (Нижний Новгород), ФГУП СКБ Института радиотехники и электроники РАН (г. Фрязино, Московской области) и др.

В последнее время ФГУП СКБ ИРЭ РАН разработало радар «Данник-5» (рис. 2).

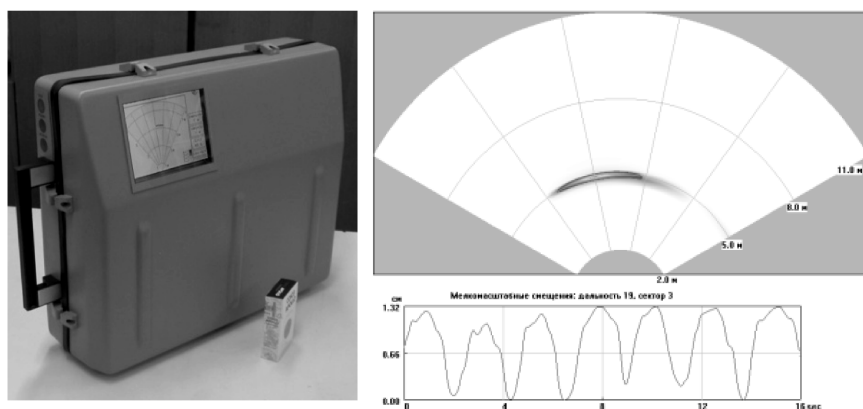


Рис. 2. Радиолокатор «Данник-5»

«Данник-5» представляет собой короткоимпульсный (длительность импульса 2 нс) радиолокатор. Он работает на частоте 3,5 ГГц, что соответствует длине волны 8,6 см. Длительность импульса и частота сигнала были выбраны из компромиссного решения обеспечения лучшего проникновения сигнала через стены, получения высокой чувствительности к перемещениям людей за стеной, требуемого разрешения по расстоянию и по азимуту при небольших размерах антенной системы.

Конструктивно «Данник-5» состоит из: радиопередающего и радиоприемного устройств, передающей и приемной активных фазированных антенных решеток, микропроцессорного устройства, пульта управления, устройства отображения информации и аккумулятора.

В последующем были разработаны еще две модификации радиолокатора – «Аидис» и «Грифон». В этих радиолокаторах используется планшетный компьютер, на котором обрабатывались различные варианты алгоритмов и программ обработки и отображения данных. В частности была введена дополнительная опция работы радиолокатора – режим георадара, которая позволяет использовать радиолокатор для исследования структуры грунта и строения инженерных сооружений. Это позволяет обнаруживать наличие заложенных минно-взрывных устройств на глубинах до 0,5 м.

В процессе работы по тематике короткоимпульсной радиолокации были исследованы возможности создания и собраны ряд макетов радиолокаторов для различного назначения, как-то: обнаружение людей в закрытых объемах, обнаружение незаконных вложений в перевозимых грузах, дистанционный контроль дыхания и пульса человека, исследование инженерных сооружений и верхнего строения автомобильных и железных дорог. Предполагается также создание радиолокатора массой не более 3 кг с угловым разрешением до 6° для обеспечения возможности получения информации о размерах человека, его положения в пространстве, наличия у него вооружения, получения информации о расположении объектов обстановки за стеной (мебели, стенок и т.п.).

Литература

1. **Матвеев В.И.** ИНТЕРПОЛИТЕХ-2012. «Территория NDT». 2013. № 1. С. 42 – 46.
2. **Имморесев И.Я.** Сверхширокополосные радары. Особенности и возможности // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 1. С. 5 – 31.
3. **Биорадиолокация.** Коллективная монография / под ред. А.С. Бугаева, С.И. Ивашова, И.Я. Иммореева. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 396 с.

НОВЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА, ПОСТРОЕННЫЕ НА МЕТОДЕ РЕГИСТРАЦИИ ОБРАТНО РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Буклей А.А., Баранов А.В., Емельянов М.Е., Паршин И.А.
ЗАО «НИИИИИ МНПО «Спектр», ООО «Флэш электроникс», ФСО России

Важной составляющей мероприятий, направленных на совершенствование антитеррористической деятельности, является оснащение специальных подразделений эффективной поисковой и досмотровой аппаратурой.

Непрерывное появление новых диверсионно-террористических средств заставляет совершенствовать используемые технические средства их обнаружения, внедрять новые технические методы. Так, миниатюризация и повышение степени интеграции полупроводниковых комплектующих предьявляет все более жесткие требования к качеству изображения рентгеновских просвечивающих комплексов, используемых при работах по обезвреживанию взрывных устройств. Использование новых материалов (керамика, пластик) делает менее эффективным применение металлоискателей для персонального досмотра посетителей, персонала, пассажиров и требует использования других технических методов досмотра.

Кроме того, имеющийся в настоящий момент опыт использования портативных рентгеновских комплексов показал, что для оперативной работы требуются принципиально новые технические средства, позволяющие получать информацию о досматриваемых объектах в условиях ограниченного (одностороннего) доступа, а также технические средства, обеспечивающие возможность скрытого дистанционного контроля.

С учетом вышеуказанных требований, компанией ООО «Флэш электроникс» был разработан модельный ряд рентгеновских интроскопов различного тактического применения, построенных на методе регистрации обратно рассеянного излучения, предназначенных для оснащения антитеррористических и специальных подразделений правоохранительных и силовых органов, и освоено их серийное производство.

1. Для оперативного досмотра, в том числе в полевых условиях, багажа и личных вещей (сумки, чемоданы, саквояжи, коробки, баулы) в условиях одностороннего доступа к объекту досмотра, предложен переносной рентгеновский комплекс «Феникс», обеспечивающий получение изображения с разрешением 0,4 мм. Масса комплекса составляет не более 13,5 кг. Комплекс камуфлируется под дорожную сумку или чемодан, размещенные на колесах, и позволяет в течение 5...20 с конфиденциально досмотреть подозрительные объекты.

Комплекс не имеет российских и мировых аналогов.

2. Для персонального досмотра посетителей, персонала, пассажиров при проходе в государственные и другие учреждения, места проведения массовых мероприятий, на объекты транспортной инфраструктуры, с целью обнаружения скрытых на теле и в одежде предметов, в том числе оружия, взрывных устройств, электронных устройств, производится стационарный рентгеновский комплекс «Рубеж-ПЧ», обеспечивающий получение изображения человека с двух сторон за время 4 с при лучевой нагрузке 30 нЗв, что соответствует аналогу производства США при существенно меньшей стоимости.

Комплекс по сравнению с методом рентгеновского просвечивания, обеспечивает большую радиационную безопасность, достаточное качество изображения даже для людей с большими физическими размерами и компактное размещение.

3. Мобильный досмотровый сканер, установленный на автомобильное шасси не заменим при оценке оперативной обстановки вокруг мест проведения массовых мероприятий, за счет патрулирования по близлежащим автомобильным дорогам, магистралям.

НОВЫЕ РЕШЕНИЯ В АНТИТЕРРОРИСТИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

Ковалев А.В., Кекин А.Г., Ненахов Ю.Ю., Ивченков А.О., Филимонов С.А.
НПЦ «СПЕКТР-АТ», Москва, Россия

Аннотация

Показаны новые решения, реализованные НПЦ «СПЕКТР-АТ» при разработке современных образцов наблюдательной и досмотровой техники. В настоящее время требования к досмотровой технике существенно расширены. Помимо обнаружения и видеофиксации, требуются документирование, трансляция в реальном времени, локализация в пространстве цели и объекта управления в случае удаленного управления или наблюдения. Такая техника характеризуется существенной гетерогенностью информационно-вычислительной среды, визуализацией телеметрии в реальном времени и многоуровневой системой управления.

Основные результаты

Трансляция видеосигнала высокого разрешения ведет к существенному увеличению конечной стоимости продукта, а разрешающая способность NTSC/PAL телесигналов накладывает ограничения на детализацию мелких объектов. Серийно выпускаемый поисково-досмотровый комплекс «Мираж-ДТВ» предоставляет возможность удаленного наблюдения, видео и аудио фиксацию в реальном времени наблюдателем, в то время как опе-

ратор осуществляет непосредственное управление положением и переключение между двумя КМОП видеосенсорами с широким и узким углами обзора. Комплекс обеспечивает осмотр труднодоступных полостей и помещений через оконные или дверные проемы, вентиляционные отверстия и прочие подходящие по размеру проемы ограждающих конструкций с помощью телевизионного или тепловизионного модулей на телескопической штанге или с помощью видеозонда.

Тепловизионный многоканальный комплекс наблюдения и контроля «ОМАР» осуществляет дистанционное управление моторизированной телекамерой с оптическим увеличением 28 крат и тепловизором. Для формирования телеметрии к удаленному оператору использованы миниатюрные микроэлектромеханические системы из компаса, акселерометра и гироскопа, а также ГЛОНАСС/GPS приемник отечественного производства. Для определения расстояния до цели использован лидар с длиной волны 1550 нм. Оператор в реальном времени может отобразить углы крена и тангажа, что существенно упрощает управление удаленным объектом на пересеченной местности или при визуальном отсутствии горизонта, а также визуализировать географические координаты комплекса и обнаруженной цели с магнитным меридианом или истинным азимутом при наличии вектора движения.

В условиях ограниченной, а иногда полного отсутствия видимости требуется не только отображение «цифрового горизонта», но и подсветка объекта наблюдения. Во избежание значительной фронтальной засветки, благодаря использованию широкоугольного рефлектора подсветки и пониженной чувствительности КМОП видеосенсора, наиболее оптимален ближний инфракрасный диапазон. Телевизионное досмотровое средство «ПОИСК-ТВ-12» позволяет регулировать интенсивность коммутативной инфракрасной подсветки 850/940 нм, вести фото и видео запись с привязкой к текущей дате и времени, дистанционно управлять углами рысканья и крена камеры. Как и поисково-досмотровый комплекс «Мираж-ДТВ» этот прибор имеет телескопическую штангу, что наделяет его вышеописанными свойствами по доступу к труднодоступным местам. Съёмные литиевые аккумуляторы типа 18650 позволяют вести непрерывную работу даже после окончания 4-х часового цикла работы первого комплекта. Мобильный монитор с диагональю 5,6 дюймов позволяет вести удаленный анализ и редактирование отснятых материалов на протяжении 2-х и более часов без подзарядки съёмных аккумуляторов, копировать записи с SD-карты для просмотра в более высоком разрешении на компьютере.

Телевизионный эндоскоп «ЭТВЦ-Т» предназначен для осмотра труднодоступных внутренних полостей объектов. Применение минителекамеры позволило отказаться от использования КМОП видеосенсоров или иных высокогабаритных цифровых решений. Компактная светодиодная подсвет-

ка размещена в одном корпусе с телекамерой, в результате сохраняется постоянный диаметр оптической трубки.

Обсуждение

Применение передовых технических решений при разработке аппаратуры позволяет получать принципиально новые для данного класса аппаратуры свойства и повышать удобство ее эксплуатации.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА НАБЛЮДЕНИЯ И ДОСМОТРА, ОРГАНИЗАЦИЯ ПУНКТОВ ПРОПУСКА (ДОСМОТРА)

Ковалев А.В.

НПЦ «Спектр-АТ», Москва, Россия

Аннотация

Целью настоящего доклада является ознакомление с новыми разработками и возможностями НПЦ «СПЕКТР-АТ» (далее Центр) по созданию технических средств, предназначенных для оснащения пунктов пропуска (ПП).

К настоящему времени в Центре сложилась четкая направленность исследований, разработки, производства и поставки технических средств по следующим, на наш взгляд, важнейшим, направлениям:

Неохлаждаемые тепловизионные аппаратурные средства различного исполнения и назначения.

Оптические (в том числе широкополосные и многоканальные) средства наблюдения и контроля.

Эндоскопические системы (оптоволоконные, телевизионные) различного исполнения.

Мобильные и портативные рентгенотелевизионные средства, рентгеновские аппараты и устройства визуализации.

Поисково-досмотровые комплекты, средства, инструмент.

Аппаратура поиска ВВ (в том числе и газоанализаторы).

Криминалистическая аппаратура.

Основные результаты

Номенклатура выпускаемой продукции – более 50 наименований, в основе которой лежат базовые физические методы: тепловой (тепловизионный), визуальный (оптический), рентгеновский (радиационный).

В докладе рассматриваются новые разработки **тепловизионных средств** (рис. 1), предназначенных для решения широкого спектра задач обеспечения безопасности. Производимые в Центре тепловизионные системы (ТПС), предназначенные для обнаружения, распознавания и визуализации удаленных теплоизлучающих объектов на фоне тепловых помех, в зависимости от дальности действия условно делятся на три группы:



Рис. 1. Тепловизионные средства

- ТПС малой дальности действия: до 0,7...1,0 км по ростовой фигуре человека и до 1,5...2,0 км по автомашине;
- ТПС средней дальности действия: соответственно 1,2...1,5 и 2...4 км, а также до 8 км по самолету;
- ТПС повышенной дальности действия, превышающей значения, соответствующие средней дальности.

К наиболее интересным разработкам в этой области относятся:

- портативные универсальные тепловизионные приборы «КАТРАН-М» и «ГРАНИТ-12»;
- тепловизионный электронно-оптический прибор «СПРУТ-2» и его модификация «СПРУТ-3»;
- выпускаемая в мобильном или стационарном вариантах размещения многоканальная система «ОМАР».

Новинками, относящимися к **оптическим средствам наблюдения**, являются (рис. 2):

- приборы ночного видения серии «КОНТУР»;
- аппаратура обнаружения скрытых малогабаритных средств телевизионного наблюдения «ГРАНАТ-2» и «АНТИСВИД-3», а также электронно-оптическая система обнаружения длиннофокусной оптики «СПИН-2».
- аппаратура визуализации наблюдаемых объектов и процессов в УФ-диапазоне электромагнитного спектра серии «КАЙМАН».

За последнее время в Центре разработаны несколько типов поисково-досмотровых **эндоскопических систем** (рис. 3), среди которых наибольший интерес могут представить:

- автономные оптоволоконные эндоскопические системы серии «ЭТА»;
- жесткие сверхтонкие эндоскопы серии «ЭТЖ-ОС» на основе оптоволоконных стержней высокого разрешения и прочности;
- телевизионный эндоскоп-трансформер со сменными рабочими модулями «ЭТВЦ-Т».



Рис. 2. Оптические средства наблюдения

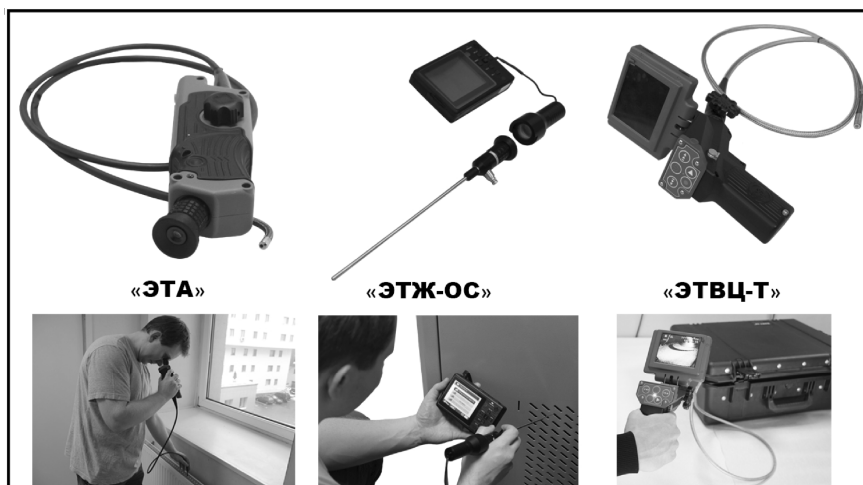


Рис. 3. Эндоскопические системы



Рис. 4. Криминалистические средства

Из новых разработок, относящихся к **криминалистическим средствам** (рис. 4), следует отметить принятую на снабжение подразделений ПС ФСБ РФ многофункциональную систему для контроля документов и проверки достоверности других печатных материалов – «ГЕНЕТИКА-09» (в двух вариантах исполнения), а также ее мобильный аналог «КОРУНД-МТВ».

Перечисленные выше технические средства имеют широкую сферу применения и предназначены, в том числе, для оснащения пунктов пропуска.

Современный (типовой) досмотровый пункт представляет собой единый комплекс технических средств, персонала и информационных ресурсов, расположенных в определенной последовательности на транспортных узлах.

Упрощенная схема размещения досмотрового оборудования на типовом пункте контроля (рис. 5).

Такие пункты контроля, установленные в аэропортах, железнодорожных вокзалах, портовых и таможенных терминалах, в местах массового скопления людей, оснащаются высокочувствительным оборудованием, обеспечивающим выявление в багаже, ручной клади или непосредственно на человеке различных запрещенных предметов, в том числе взрывчатых, наркотических и отравляющих веществ.

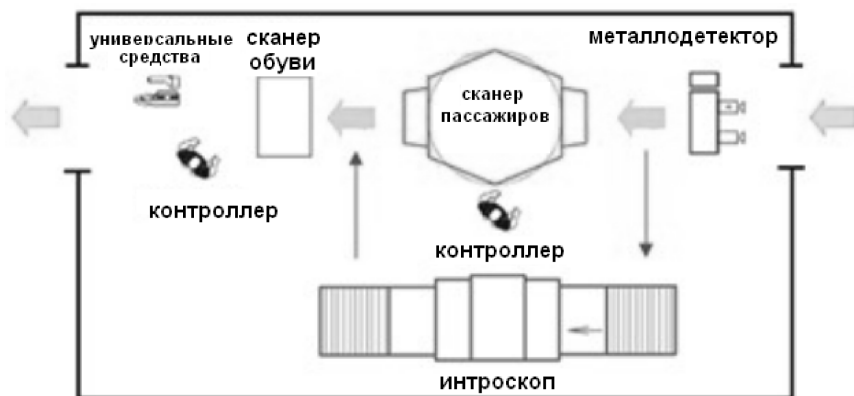


Рис. 5. Упрощенная схема размещения досмотрового оборудования на типовом пункте контроля

Обсуждение

В настоящее время актуальным является применение технических средств, обеспечивающих дистанционное выявление взрывчатых веществ (ВВ) и взрывных устройств (ВУ), размещенных под одеждой, а также оценку психофизиологического состояния людей, приближающихся к зоне контроля.

Разработки такой техники ведутся в Центре, получены достаточно обнадеживающие результаты, некоторые из которых будут приведены в докладе. Следует отметить, что лучшие результаты по дистанционному обнаружения ВВ и ВУ, скрытых под одеждой, получены при различных вариантах комплексации аппаратных средств, основанных на радиоволновом методе (в том числе и терагерцового диапазона), тепловом (тепловизионном) и оптическом (включая видимый и ближний ИК-диапазоны). А дистанционная оценка психофизического состояния человека на основе комплексации оптического и тепловизионного методов требует серьезных исследований, направленных на поиск алгоритмов и создания высокоинформативных технических средств.

Литература

1. **Ковалев А.А., Ковалев А.В.** Технические средства антитеррористической и криминалистической диагностики. М.: Издательский дом «Спектр», 2011. 206 с.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Ковалев А.В., Студитский А.С., Кекин А.Г.
НПЦ «Спектр-АТ», Москва, Россия

Аннотация

Современные наблюдательные системы представляют собой сложные интегрированные аппаратно-программные комплексы, включающие в себя различные каналы регистрации информации, средства обработки и представления. Основные требования при создании таких систем – повышение вероятности и достоверности обнаружения объектов, повышение наглядности представления информации и удобства ее интерпретации оператором для принятия адекватных решений. В докладе представлены новые разработки НПЦ «Спектр-АТ» – многоканальные наблюдательные системы «Омар», «Спрут-2», «Кайман-2», а также ряд перспективных проектов, объединенных комплексным подходом к получению и обработке информации о контролируемых объектах.

Основные результаты

Многоканальные наблюдательные системы строятся по принципу получения максимальной информации о контролируемом объекте, способной произвести обнаружение и достоверную идентификацию типа объекта. В первую очередь это достигается за счет объединения в едином приборе двух или большего числа наблюдательных каналов. Второй этап – это обработка и выбор способа представления полученной информации. Наиболее эффективным для носимых приборов является совмещение изображений, получаемых с различных каналов, с автоматическим выделением из потока данных информации, характерной для искомых объектов.

Наблюдательные комплексы «Омар» и «Спрут-2» предназначены для обнаружения и идентификации людей и транспортных средств на открытой местности. Основными информационными каналами в них являются тепловизионный и масштабируемый телевизионный в стационарной системе «Омар» и тепловизионный и ночной или тепловизионный и лазерный локационный в портативном приборе «Спрут-2» соответственно для модификаций «Спрут-2НВ» и «Спрут-2ОЛ».

Наблюдательный комплекс «Омар», оснащенный помимо наблюдательных каналов навигационным оборудованием, позволяет не только обнаруживать и идентифицировать цели, но и определять их координаты – как относительные (азимут, удаление), так и абсолютные за счет привязки к собственным координатам, определяемым с помощью двухдиапазонного приемника GPS/ГЛОНАСС. Носимый прибор «Спрут-2НВ» предназначен для работы в условиях низкой освещенности – в сумерках и в ночное время, позволяя вести наблюдение как с помощью тепловизионного канала для обнаружения теплоизлучающих объектов, так и с помощью прибора ночью-

го видения на ЭОП для осмотра местности. Модификация «Спрут-2ОЛ» с лазерным локационным каналом, позволяющим обнаруживать оптические прицелы и длиннофокусную оптику на дистанциях до 1 км, предназначен для специальных применений в ходе спецопераций, при охране важных лиц и объектов, для предотвращения террористических угроз.

Двухканальный прибор «Кайман-2», объединяющий ультрафиолетовый сенсор и камеру видимого диапазона предназначен для обеспечения энергетической безопасности. Он позволяет в любое время суток обнаруживать коронные разряды на высоковольтном электрооборудовании, свидетельствующие о дефектах и аварийно-опасном состоянии на станциях электроснабжения и высоковольтных линиях. Благодаря примененным техническим решениям и специальным алгоритмам обработки изображений «Кайман-2» превосходит аналоги, позволяя работать в любое время суток и безошибочно локализовать дефектные зоны и степень их опасности для своевременного принятия мер реагирования.

Обсуждение

Комплексный подход при создании наблюдательных систем позволяет значительно повысить их эффективность по сравнению с использованием отдельных контрольных приборов за счет возникновения системного эффекта. Полученные результаты и разработанная аппаратура могут быть интересны специалистам в области общественной и техногенной безопасности.

Литература

1. **Ковалев А.А., Ковалев А.В.** Технические средства антитеррористической и криминалистической диагностики: учебное пособие / под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Издательский дом «Спектр», 2011. 206 с.; ил. (Диагностика безопасности).
2. **Студитский А.С., Кекин А.Г.** Повышение эффективности интегрированных многоканальных наблюдательных систем // Приборы. 2013. № 9. С. 52 – 55.

ДЕТЕКТОРЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДА МЕЧЕННЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ (ДОСМОТРА) ОБЪЕКТОВ ПОД ВОДОЙ

Рогачев А.В.

ООО «Нейтронные технологии», г. Дубна, Россия

Введение

Обнаружение скрытых веществ в подводных потенциально опасных объектах является весьма актуальной задачей, необходимость решения которой продиктована деятельностью по борьбе с терроризмом, а также по-

требностью в технических средствах, позволяющих выявлять источники загрязнений водных акваторий океанов, морей и рек разнообразными опасными веществами (взрывоопасными, радиоактивными и сильнодействующими ядовитыми веществами).

Для поиска скрытых веществ в различных средах наибольшей достоверностью полученных результатов обладают системы, основанные на прямых методах обнаружения. Это, прежде всего, относится к различным устройствам, использующим, например, методы химического анализа вещества и метод, в основе которого лежит явление ядерного квадрупольного резонанса. Однако применение указанных методов весьма ограничено – наличие герметично упакованной или непроницаемой металлической оболочки делает невозможным обнаружение скрытых опасных веществ. Дополнительными ограничениями накладывают и водное окружение объекта. В таких случаях необходимо применение таких методов обнаружения, в основе которых лежит использование излучения, обладающего высокой проникающей способностью и характерными признаками взаимодействия его с химическими элементами.

Метод меченых нейтронов (ММН) [1] – уникальный способ обнаружения скрытых веществ, чувствительный к элементному составу, и, пожалуй, единственный актуальный метод, допускающий применение его в водной среде. Исследуемый объект облучается нейтронами с энергией 14,1 МэВ, образующимися в бинарной реакции $d + t \rightarrow \alpha + n$. В результате реакции неупругого рассеяния быстрых нейтронов на ядрах вещества облучаемого объекта (реакция $A(n, n'\gamma)A$) образуются гамма-кванты с характерной энергией для каждого из химических элементов, входящих в состав данного вещества. Спектры зарегистрированного характеристического гамма-излучения содержат информацию об элементном составе облучаемого вещества, а также о количественном их содержании. Для взрывчатых веществ соотношения между собой концентраций ядер азота, кислорода и углерода (N/O, C/O, N/C), отличаются от аналогичных соотношений для большинства обычных веществ. Для отравляющих веществ (таких как иприт, зарин) в спектре можно выделить линии характеристического гамма-излучения на ядрах фтора, хлора, фосфора, и использовать соотношение их концентраций к концентрациям ядер углерода.

Основные результаты

Использование ММН было реализовано ООО «Нейтронные технологии», имеющей большой опыт внедрения метода в системах обнаружения взрывчатых веществ, при разработке нейтронного досмотрового модуля [2, 3] в рамках проекта «Акваэкомониторинг». Проект реализуется по заказу Министерства промышленности и торговли РФ. Разрабатываемая аппаратура будет входить в состав комплекса средств мониторинга экологической обстановки и поиска объектов, содержащих опасные вещества под водой.

Опытный образец системы (рис. 1) представляет собой подводный спускаемый аппарат, включающий: блок нейтронного генератора на основе генератора ИНГ-27 со встроенным 9 секционным кремниевым альфа-детектором [4], блок регистрации и обработки амплитудных и временных сигналов с альфа- и гамма-детекторов, источник питания компонентов системы, блок гамма-детектора на основе кристалла ВГО [5]. Управление осуществляется одним оператором с мобильного ПЭВМ дистанционно на удалении не более 100 м. Позиционирование системы относительно обследуемого объекта осуществляется с использованием системы лазерных целеуказателей.

Экспериментальные исследования с использованием опытного образца выполнялись в Адриатическом море в районе острова Крк.

Исследуемыми объектами являлись образцы имитаторов, которые не содержат взрывчатых веществ, но позволяют имитировать взрывчатые вещества как по их плотности, так и по процентному содержанию составляющих их основных химических элементов.

Были использованы имитаторы следующих опасных веществ: ТНТ, гексоген, ТАТР, иприт, зарин, а также меламин. Энергетические спектры перечисленных образцов были получены в различных экранирующих условиях.

Была проведена серия измерений, на основе которой разработан алгоритм анализа экспериментальных данных, позволяющий производить обнаружение взрывчатых и отравляющих веществ. Измерения показали успешную работу программы автоматической обработки данных и принятия решений.



Рис. 1. Общий вид подводного обнаружителя на основе ММН



Рис. 2. Обследование системой на основе ММН авиационной мины на морском дне

Детектор позволил производить обнаружение имитаторов взрывчатых веществ, помещенных в корпуса авиационной мины, артиллерийского снаряда и фугасной авиабомбы, а также обнаружение имитаторов токсичных веществ в металлических контейнерах (рис. 2).

Заключение

В ходе выполненных испытаний была показана адекватность и эффективность использования ММН для задач, связанных обнаружением скрытых веществ в подводных потенциально опасных объектах.

В настоящее время ведется доработка конструкции подводного обнаружителя и размещение его на платформе, снабженной подводными двигателями.

Необходимо отметить, что применение ММН под водой не ограничивается поиском опасных веществ и может быть использовано для более широкого круга задач неразрушающего контроля объектов под водой.

Литература

1. **Сапожников М.Г.** Детекторы на основе метода меченых нейтронов // Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе: труды Международной научно-технической конференции, Москва, 22 – 26 октября, 2012.
2. **Bystritsky V.M.** et al. Use of the Tagged Neutron Technique for Detecting Dangerous Underwater Substances, *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2013. V. 10, No. 7. P. 860 – 867.

3. **Быстрицкий** и др. Применение метода меченых нейтронов для обнаружения опасных веществ под водой // Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе: труды Международной научно-технической конференции, Москва, 22 – 26 октября, 2012.

4. **Bystritsky V.M.** et al. Portable Neutron Generator with 9-Section Silicon α -Detector Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research E13-2006-36, Dubna, 2006.

5. **Bystritsky V.M.** et al. Gamma Detectors in Explosives and Narcotics Detection Systems, Physics of Particles and Nuclei Letters. 2013. V. 10, No. 6. P. 566 – 572.

ДЕТЕКТОРЫ ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА МЕЧЕННЫХ НЕЙТРОНОВ

Сапожников М.Г.

ООО «Нейтронные технологии», г. Дубна, Россия

Детекторы на основе метода меченых нейтронов (ММН) получили распространение как средство обнаружения опасных веществ (взрывчатых, сильнодействующих ядовитых, наркотических, радиоактивных) скрытых в различных объектах досмотра [1 – 7].

Метод меченых нейтронов состоит в облучении объекта досмотра пучком быстрых нейтронов с энергией 14 МэВ, которые возникают в бинарной ядерной реакции $d + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + n$.

Направление вылета нейтрона определяется путем регистрации (мечения) α -частицы, сопутствующей нейтрону, специальным α -детектором. Меченые нейтроны индуцируют в ядрах объекта досмотра реакции неупругого рассеяния $n + A \rightarrow n + \gamma + A^*$. Возбуждение ядер снимается испусканием γ -квантов с энергетическим спектром, характерным для каждого химического элемента. Регистрация характеристического γ -излучения осуществляется гамма-детекторами в совпадениях с сигналом от α -детектора. Измерение длительности временного интервала между сигналами с α - и γ -детекторов позволяет определить расстояние от источника нейтронов до точки, из которой был испущен γ -квант, поскольку скорость нейтрона постоянна и равна 5 см/нсек. Таким образом, ММН дает возможность определить все три координаты области, в которой исследуется элементный состав.

Основное достоинство детекторов на основе ММН состоит в том, что они предоставляют информацию об элементном составе вещества. Этим они отличаются от рентгеновских сканеров, которые чувствительны к заря-

ду и плотности вещества, но не к его элементному составу. Рентгеновские сканеры с легкостью обнаруживают бутылку в багаже пассажира, но не могут определить состав жидкости в бутылке. Детекторы на основе ММН лишены этого недостатка.

Другое важное преимущество ММН – он предоставляет информацию о трехмерном положении скрытого опасного вещества. Этим детекторы ММН отличаются от газоанализаторов, которые только фиксируют сам факт присутствия опасного вещества, но не его местоположение в объекте досмотра.

Для детекторов ММН не имеет значение герметична ли упаковка опасного вещества. В отличие от спектрометров рамановского рассеяния они одинаково хорошо досматривают как содержимое прозрачных, так и непрозрачных сосудов.

Мечение нейтронов позволяет получить временную информацию, которая может быть использована для того, чтобы выбрать события только из определенного временного интервала. Это приводит к резкому уменьшению фона. Показано [3 – 5], что использование (α - γ)-совпадений увеличивает отношение сигнал-фон более, чем в 200 раз, что существенно улучшает условия обнаружения скрытых веществ.

В ММН используются быстрые нейтроны с энергией 14 МэВ, которые обладают большой проникающей способностью. Это дает возможность сделать на основе ММН установки для досмотра крупногабаритных грузов, вплоть до морских контейнеров.

Важно, что детекторы ММН не ограничены в нахождении только лишь одного вещества, например, азота. С помощью ММН можно определять концентрации самых различных элементов – С, N, O, S, Mg, Mn, Ca, P, Fe, Si, Al, Cl и др. Это дает возможность использовать ММН не только для поиска взрывчатых веществ, скрытых в различных объектах досмотра, но и контролировать наличие сильнодействующих ядовитых или наркотических веществ. Что касается взрывчатых веществ, то на сегодня детекторы ММН могут обнаруживать и идентифицировать более 30 различных взрывчаток.

Очень важно, что облучение быстрыми нейтронами не создает радиационных угроз ни объектам досмотра, ни окружающей среде. Это подтверждено заключениями Ростехнадзора РФ.

Наконец, детекторы ММН принимают решение о степени опасности объекта досмотра в автоматическом режиме, без участия оператора.

Наибольшее распространение получили переносные детекторы ДВиН-1 на основе ММН. В 2011 – 2013 гг. была поставлена 91 система для оснащения досмотровых зон Московского, Петербургского, Новосибирского, Казанского, Самарского метрополитенов, а также для различных вокзалов РФ.

Детектор ДВИН-1 состоит из портативного нейтронного генератора ИНГ-27 со встроенным 9-пиксельным кремниевым альфа-детектором, гамма-детектора на основе кристалла ВГО, электроники приема и анализа данных, системы электропитания и интерфейса пользователя. Детектор позволяет обнаруживать более 30 видов взрывчатых веществ, минимальная детектируемая масса за 10 мин составила 25 г.

Для Межрегионального пункта по исследованию и обезвреживанию взрывных устройств ФСБ был разработан стационарный детектор на основе ММН, который позволяет осуществлять досмотр объекта 64 пучками меченых нейтронов.

Недавно по заказу ФСБ была разработана стационарная система для детектирования жидких взрывчатых веществ, предназначенная для работы в аэропортах.

Большой интерес представляет разработка портала для досмотра крупногабаритных объектов, в котором рентгеновский излучатель совмещен с нейтронным модулем. Рентгеновский сканер задает целеуказание, а детектор на основе ММН осуществляет элементный анализ выбранной области объекта досмотра.

Однако, несмотря на значительные успехи в применении детекторов ММН для обнаружения опасных веществ, многие проблемы в использовании ММН как метода количественного анализа остаются неисследованными и нуждаются в дальнейшей разработке.

Литература

1. **Ussery L.I.** et al. Los Alamos Nat. Lab Report LA12847-MS (October 1994).
2. **Rhodes E.** et al. SPIE, 1993. V. 2092. P. 288; **Rodes E.** et al. IEEE Trans. Nucl. Science, 1992. V. 39. P. 1041 – 1045.
3. **Bystritsky V.M.** et al. Proceedings of the 4th International Symposium on Technology and Mine Problem, Naval Postgraduate School, March 13 – 16, Monterey, California, 2000.
4. **Bystritsky V.M.** et al. Proceedings of the International Conference on Requirements and Technologies for the Detection, Removal and Neutralization of Landmines and UXO, EUDEM2-SCOT-2003, 15 – 18 September 2003, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium, 2003. V. 1, 2.
5. **Bystritsky V.M.** et al. JINR Communications, E13-2006-36, 2006.
6. **Bystritsky V.M.** et al. Physics of Particles and Nuclei Letters, 2008. 5. P. 441.
7. **Bystritsky V.M.** et al. Physics of Particles and Nuclei Letters, 2013. 10. P. 860.

МАЛОГАБАРИТНЫЙ РАДИАЦИОННЫЙ ИНТРОСКОП С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ ПАНЕЛИ

Семенов Ю.В.¹, Манушкин А.А.¹, Усачев Е.Ю.¹, Усачев В.Е.²

¹*Московский государственный технический университет радиотехники,
электроники и автоматики, Москва, Россия;*

²*ООО «Диагностика-М», Москва, Россия*

При проведении поисковых мероприятий в целях выявления взрывных устройств и других незаконных вложений внутри почтовой корреспонденции, предметов интерьера, мебели и различных бытовых предметах используются радиационные интроскопы. В МГТУ МИРЭА создан малогабаритный интроскоп, у которого для регистрации рентгеновского изображения используется цифровая панель.

При использовании этого интроскопа получаемое видимое теневое изображение по качеству приближается к рентгеновскому снимку и превосходит качество изображения на экране рентгенотелевизионной установки. Чувствительность контроля стальных образцов толщиной до 20 мм соответствует требованиям второго класса чувствительности ГОСТ 7512–82.

В докладе приводятся блочная схема и фотография интроскопа, его тактико-технические характеристики, а также примеры получаемых теневых изображений.

ИНСПЕКЦИОННО-ДОСМОТРОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ОБСЛЕДОВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНОГО ТРАНСПОРТА И МОРСКИХ КОНТЕЙНЕРОВ

Усачев Е.Ю., Штейн М.М., Щетинкин С.А., Чахлов С.В., Лебедев М.Б.
*Московский государственный технический университет радиотехники,
электроники и автоматики (Лаборатория ТСНК), Москва, Россия*

В 20012–2013 гг. в МГТУ МИРЭА в содружестве с ООО «Фотон», г. Томск, и Томским политехническим университетом разработаны, изготовлены и переданы Заказчику три вида комплексов, предназначенных для радиационного досмотра крупногабаритного транспорта и морских контейнеров:

- стационарный комплекс, для размещения которого требуется специальный ангар, оборудованный радиационной защитой;
- перемещаемый комплекс, который может устанавливаться в помещениях, не оборудованных радиационной защитой;
- мобильный досмотровый комплекс технических средств на базе шасси КАМАЗ-65201 с колесной формулой 8×4.

В докладе рассмотрено назначение и тактико-технические характеристики как комплексов в целом, так и отдельных устройств, входящих в состав этих комплексов.

КОМПЛЕКС ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ В РУЧНОЙ КЛАДИ

Усачев Е.Ю.¹, Передерий А.Н.¹, Ольшанский Ю.И.², Семейкин Н.П.³

¹*Московский государственный технический университет радиотехники,
электроники и автоматики, Москва, Россия;*

²*ОАО «Научно-технический центр «РАТЕК», Санкт-Петербург, Россия;*

³*ООО «ЛОГИС», г. Жуковский, Московская обл.*

Повышение вероятности обнаружения взрывчатых веществ внутри упаковок различного типа может быть достигнуто в результате комплексного применения досмотровых технических средств, основанных на различных поисковых методах. В целях обеспечения безопасности на транспорте в МГТУ МИРЭА создан Комплекс для обнаружения в ручной клади взрывчатых веществ. Комплекс предназначен для выполнения досмотра багажа и ручной клади пассажиров на наличие взрывчатых веществ, а также радиоактивных веществ и делящихся материалов. Технические средства, входящие в состав комплекса составляют единую аппаратно-информационную систему, работающую в автоматическом режиме. Управление комплексом осуществляется при использовании автоматизированной системы управления, которая обеспечивает проведение досмотра по заданной технологии. Комплекс может быть интегрирован в общую систему предпосадочного обслуживания багажа и ручной клади пассажиров конкретного объекта транспортной инфраструктуры.

Комплекс состоит из рентгеновского сканирующего интроскопа, досмотровой установки на основе ядерного квадрупольного резонанса, досмотровой установки на основе нейтронного зондирования и радиационного монитора. Перемещение багажа и ручной клади в процессе досмотра осуществляется с помощью транспортеров и сортировочных устройств.

В докладе приведены тактико-технические характеристики комплекса и алгоритм его работы.

ПРИМЕНЕНИЕ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И БОРЬБЫ С ТЕРРОРИЗМОМ

Цыбульский Е.А.¹, Матвеев В.И.²

¹*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия;*

²*ЗАО НИИИИИ МНПО «Спектр», Москва, Россия*

С каждым годом информация становится все более ценным ресурсом. Стоимость интеллектуальной собственности постоянно повышается и интерес к ней тоже возрастает, в том числе и со стороны нежелательных

субъектов. Поэтому вопрос о безопасности информации давно стал крайне актуальным.

Развитие современных технических средств позволяет защитить от утечек по многочисленным техническим каналам. Но такие системы становятся практически бесполезными при условии физического доступа к носителям информации. Таким образом, наименее надежной составляющей любой системы обеспечения информационной безопасности является человеческий фактор.

Риски похищения (изменения, порчи) можно снизить, если обеспечить контроль физического доступа, т.е. не пускать на территорию только доверенных лиц – персонал с соответствующими правами. Но и за персоналом требуется контроль. Традиционный подход с применением охранных структур теряет свою эффективность пропорционально росту численности персонала и посетителей. Для повышения эффективности пропускного контроля внедряются автоматизированные системы контроля и управления доступом (СКУД).

СКУД представляет собой технические средства, информационные ресурсы и персонал, соединенные в единый комплекс. Физическое воплощение типовой СКУД состоит из нескольких блоков (составных частей) – устройства преграждающие управляемые (УПУ), устройства исполнительные (УИ), устройства считывающие и идентификаторы (УЧИ), средства управления в составе аппаратных устройств и программах средств (СУ), а также системы видеонаблюдения.

УПУ позволяют упорядочить поток посетителей, т.е. создать условия для контролируемого и упорядоченного прохождения контроля. Они представляют двери, ворота, турникеты, шлюзы и так далее. УИ – это именно та часть СКУД, которая по своему назначению должна помешать злоумышленнику несанкционированно проникнуть через пункт контроля, т.е. представляют собой различного рода замки (электронные или механические). От их надежности и прочности зависит вероятность прямого физического проникновения на контролируемую территорию.

В современных реалиях УПУ не обязано выполнять функции «непробиваемой двери», так как всегда находится под наблюдением службы безопасности. Злоумышленники все реже пытаются проникнуть на территорию во вне рабочее время, а стараются выдать себя за персонал организации. Таким образом, основная нагрузка по обеспечению безопасности ложиться не на «двери и замки», а на системы идентификации.

Процедура идентификации представляет опознания объекта (человека-пользователя) по предъявленному идентификатору, установление тождества объекта или личности по совокупности общих и частных признаков.

Процесс идентификации разделяют на следующие типы:

– ручные (определение подлинности личности осуществляется контролером на основе предъявляемого пропуска с фотографией владельца);

- по собственности (пропуск, пластиковая карта, ключ или общегражданские документы);
- по секрету (пароли, коды или секретная информация);
- по биометрическим характеристикам (на основе верификации).

Ручная идентификация обладает малой эффективностью и полностью зависит от человеческого фактора – профессионализма контролирующего персонала. Даже самый внимательный и ответственный сотрудник службы безопасности не может долгое время обрабатывать большой поток людей. Идентификация с использованием ключей, магнитных пропусков или паролей удобна в применении, но обладает существенным недостатком – идентификационный признак не привязан к пользователю. Злоумышленник может заполучить (или изготовить дубликат) ключ или пропуск, а дальше воспользоваться им, не вызвав подозрения у службы безопасности.

Устранить данный недостаток позволит применение биометрических технологий, т.е. идентификация человека на основе его уникальных анатомических или психологических характеристик. Применение биометрических УЧИ позволит отказаться от физических идентификаторов, а следовательно исключить вероятность их кражи или потери.

Процесс биометрической идентификации заключается в снятии биометрической информации, выделении из нее уникального идентификатора и сравнения его с учетной записью пользователя в базе данных СКУД.

В настоящее время наиболее часто используются следующие биометрические признаки: папиллярный рисунок на пальце; радужная оболочка глаза; геометрия лица; геометрия кисти руки; рисунок вен ладони; голос.

Перспективными, но малоизученными направлениями является идентификация по рисунку подкожных сосудов и геометрии ушной раковины.

Для сравнения эффективности использования различных биометрических признаков введем качественные характеристики: точность (надежность), быстродействие, удобство, независимость, защищенность, стоимость. Удобство объединяет в себе качества, отталкивающие пользователя проходить контроль (яркий свет в глаза, прикосновение к самому прибору, нанесение на кожу красок и т.д.). Также в этот пункт можно отнести массогабаритные параметры приборов, реализующих биометрическую систему. Быстродействие определяет время с момента запроса пользователем права на проход и временем получения ответа от системы. Слишком большое ожидание получения права прохода может привести к образованию затора у терминала, что в свою очередь приведет к негативной реакции пользователей. Под независимостью биометрической системы подразумевается прежде всего неизменность биометрических параметров со временем (старение кожи, помутнения хрусталика), а также защищенность от влияния внешних факторов (загрязнения, освещенности и т.д.). Защищенность характеризует возможность обхода системы или изготовления поддельного идентификатора. Точность или надежность системы являются основными параметрами,

1. Сравнительная характеристика биометрических признаков

	Точность	Быстродействие	Удобство	Защищенность	Независимость	Стоимость
Отпечатки пальцев	4	5	5	3	4	3
Радужная оболочка глаза	5	4	3	5	5	5
Черты лица	2	4	5	3	3	3
Геометрия ладони	3	5	4	3	4	3
Голос	3	4	5	4	3	5

характеризующими ее качество, т.е. вероятности ложного срабатывания или ошибки системы.

В таблице 1 представлена сравнительная характеристика применения в СКУД различных биометрических характеристик, составленная методом экспертных оценок. Шкала оценок от 1 до 5: чем выше оценка, тем более оправдано применение признака.

Из приведенной таблицы видно, что ни один из рассмотренных способов не может считаться универсальным. Наиболее точной и защищенной является идентификация по радужной оболочке глаза, наиболее быстродействующими и менее затратными – по отпечатку пальца или геометрии ладони, наиболее удобными – по чертам лица или голосу.

Биометрические технологии могут применяться не только в СКУД, но и системах скрытого поиска и обнаружения людей. Такие системы могут устанавливаться на транспортных узлах или других особо важных объектах и непрерывно считывать биометрическую информацию всех людей в заданной зоне с целью выявления лиц, представляющих угрозу. Одним из перспективных направлений является создание комплексов видеонаблюдения, которые могут выявлять отдельных лиц из потока людей, основываясь на базе данных разыскиваемых преступников или по проявлению определенного эмоционального поведения.

Литература

1. **Ворона В.А., Тихонов В.А.** Системы контроля и управления доступом. М.: Горячая линия-Телеком, 2010. 272 с.
2. **ГОСТ Р 51241–2008.** Средства и системы контроля и управления доступом. Классификация. Общие технические требования. Методы испытаний.
3. **Матвеев В.И., Цыбульский Е.А.** Состояние и развитие современных систем контроля и управления доступом. MEGATECH. 2012. № 4. С. 10 – 16.

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ СПЕКТРОМЕТР ПОДВИЖНОСТИ ИОНОВ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Эпинатьев И.Д., Рощин А.В., Кумпаненко И.В.
*Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (ИХФ РАН),
Москва, Россия*

Возросшая угроза терроризма в мире и необходимость адекватного ответа на нее заставляют совершенствовать технические средства обнаружения и распознавания взрывчатых веществ (ВВ). При этом одним из наиболее важных мероприятий является организация контроля перемещения и хранения ВВ. С этой целью таможенные терминалы в аэропортах, пункты контроля на железных дорогах и автотрассах, временные склады и перевалочные хранилища должны быть оснащены техническими средствами такого контроля.

Важно отметить, что наряду со средствами стационарного контроля, к которым относятся крупногабаритные дорогостоящие приборы, большой интерес представляют недорогие портативные переносные устройства с автономным питанием, которые можно размещать в замкнутых пространствах хранения багажа и грузов для осуществления непрерывного контроля в режиме реального времени.

При контроле за перемещением ВВ очень важным аспектом является возможность как установления факта присутствия ВВ в определенном ограниченном пространстве (на складе, в контейнере, в группе предметов багажа, ящиков, коробок), так и способность локализации конкретного места, в котором находится данное ВВ.

В настоящем проекте в качестве приборной основы для разработки комплексного физико-химического метода обнаружения и распознавания ВВ был выбран метод спектроскопии подвижности ионов (СПИ) [1 – 9]. Этот метод обладает высокой чувствительностью при регистрации газообразных компонентов, сопоставимой с чувствительностью масс-спектрометра.

В анализаторах, основанных на этом методе, не требуется создания высокого вакуума, что существенно упрощает их конструкцию по сравнению с другими аналитическими устройствами, в которых используются процессы ионизации, например, таких как масс-спектрометры, хромато-масс-спектрометры, электронные спектрометры.

Спектрометры подвижности ионов в базовом исполнении в настоящее время довольно широко распространены. Ими оснащены, в частности, пункты контроля в аэропортах, вокзалах и т.п. Однако у выпускаемых приборов имеется существенный недостаток, связанный со слабой селективностью СПИ метода. Другими словами, с помощью такого анализатора мож-

но установить факт наличия ВВ, но не распознать какое именно из них обнаружено.

Для решения проблемы распознавания ВВ был разработан макетный образец модифицированного спектрометра подвижности ионов для обнаружения и распознавания взрывчатых веществ [10, 11], в состав которого входят блок пробоподготовки, модуль управления работой спектрометра с обратной связью, модуль обработки спектров и анализа полученной информации с применением специальных алгоритмов оценки вероятностей достоверного обнаружения ВВ и ложного срабатывания системы. Проведены лабораторные испытания модифицированного спектрометра по обнаружению и распознаванию 28 наименований взрывчатых веществ из классов нитросоединений, нитроаминов, эфиров азотной кислоты, солей азотной кислоты и пр. Показано, что вероятность достоверного обнаружения критической массы ВВ $\geq 97\%$, а вероятность ложных тревог срабатывания при обнаружении ВВ $\leq 5\%$.

Литература

1. **Collins D.C., Lee M.L.** // *Anal. Bioanal. Chem.* 2002. V. 372. P. 66.
2. **Eiceman G.A.** // *Trends in Anal. Chem.* 2002. V. 21. P. 259.
3. **Borsdorf H., Eiceman G.A.** // *Appl. Spect. Rev.* 2006. V. 41. P. 323.
4. **Asbury G.R., Wu C., Siems W.F., Hill H.H.** // *Anal. Chim. Acta.* 2000. V. 404. P. 273.
5. **Buryakov I.A., Krylov E.V., Nazarov E.G., Rasulev U.Kh.** // *Int. J. Mass Spectrom. Ion Process.* 1993. V. 128. P. 143.
6. **Nazarov E.G., Eiceman G.A., King A.T.** // *Sensors and Actuators. A: Physical.* 2001. V. 91. P. 307.
7. **Miller R.A., Eiceman G.A., Nazarov E.G., King A.T.** // *Sensors and Actuators. B: Chemical.* 2000. V. 67. P. 300.
8. **Buryakov I.A.** // *Talanta.* 2003. V. 61. P. 369.
9. **Wu C., Steiner W.E., Tornatore P.S. et al.** // *Talanta.* 2002. V. 57. P. 123.
10. **Эпинатьев И.Д.** и др. Исследование влияния центров селективной абсорбции на процессы диффузии в полимерных пленках // *Высокомолекулярные соединения.* 2010. Т. 52, № 2. Серия А.
11. **Эпинатьев И.Д.** и др. Оценка вероятностных характеристик обнаружения и распознавания взрывчатых веществ, при использовании приборного комплекса, включающего спектрометр подвижности ионов // *Химическая физика.* 2012. Т. 31, № 10. С. 66 – 73.

СЕКЦИЯ 11. СЕРТИФИКАЦИЯ ПЕРСОНАЛА, СТАНДАРТИЗАЦИЯ, МЕТРОЛОГИЯ МЕТОДОВ НК И ТД

Руководители секции: Коновалов Н.Н., Артемьев Б.В.

ОПЫТ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ СЕРТИФИКАЦИИ ПЕРСОНАЛА В УЗБЕКИСТАНЕ

Азизова Е.А.

НГМК, Навои (Узбекистан)

В Узбекистане с 2009 года в качестве национальных действуют стандарты ISO/IEC 17024:2003 и ISO 9712:2005. В настоящее время в завершающей стадии находится утверждение ISO 9712:2012. Разработку изменений и добавлений к процедурным документам системы сертификации персонала неразрушающего контроля осуществляет аккредитованный в национальной системе Орган по сертификации персонала (ОСПНК) при Навоийском горно-металлургическом комбинате.

Опыт подтверждения квалификации специалистов в сфере НК, ведения государственного реестра сертифицированного персонала, процедуры инспекционного контроля был использован в создании и аккредитации в республике Органа по сертификации менеджеров по качеству и аудиторов по качеству при НИИ стандартизации, метрологии и сертификации. В настоящее время разрабатывается проект формирования системы сертификации персонала в сфере стандартизации и метрологии.

В сотрудничестве с Международным Агентством по Атомной Энергии в Узбекистане ОСПНК участвует в проектах, направленных на развитие системы квалификации персонала НК в соответствии с требованиями международных стандартов, а также на внедрение в процесс обучения современных интерактивных и дистанционных методов.

СИСТЕМА ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА РОНКТД

Артемьев Б.В.¹, Артемьев И.Б.²

¹*ЗАО НИИИИИ МНПО «Спектр», Москва, Россия;*

²*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*

В докладе рассматривается «Система дистанционного обучения» (СДО) Российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике (РОНКТД), которая позволяет всем специалистам, заинтересованным в получении знаний в области неразрушающего контроля и технической диагностики (НК и ТД) пройти теоретическую подготовку без отрыва от основной работы.

Сегодня, даже по сравнению с концом прошлого века, резко увеличилось количество информации по НК и ТД доступной молодым специалистам, которым начиная свою карьеру в этой области, крайне трудно выбрать полезные для обучения материалы. Более того, некоторая информация с течением времени теряет свою актуальность, а введение новых правил и стандартов приводит к необходимости внесения существенных изменений в программы курсов подготовки. Переиздание книг и учебников требует длительного времени и больших материальных ресурсов. Издатели не заинтересованы в выпуске новой редакции до полной реализации предыдущего тиража. Перспективной альтернативой традиционным методам обучения является дистанционное обучение. В разных странах и университетах, этот термин относится к совершенно иной технологии. Например, в Университете Саутгемптона (Великобритания), это понятие скрывается технологию обучения, по которой студенты (учащиеся) по почте, включая электронную, получают и отправляют контрольные и учебные материалы. Студенты освоив материал и выполняют тесты. Результаты возвращаются в университет на рассмотрение. Аналогичная технология используется в физико-математической школе МФТИ (Россия), и многих других учебных заведениях. Использование электронной почты доставки материалов значительно уменьшает доставку материалов, но не изменить сам принцип процесса обучения.

Совсем иначе организован учебный процесс, в случае использования идеи интерактивного обучения. Нами созданы электронные ресурсы, которые находятся в сети 24×7 и обеспечивают доступ заинтересованных лиц к тематическому содержанию. Кроме того, такие системы обеспечивают для ученика возможностью пассивно: читать, слушать, смотреть видео и анимации, но и возможностью оперативного самоконтроля и прохождения тестов. Такой подход к обучению постепенно становится доминирующей глобальной тенденцией. Основные международные организации, в том числе МАГАТЭ признают, что возможности, предоставляемые системами дистанционного обучения, являются наиболее важным инструментом для дальнейшего развития и гармонизации сертификации НК персонала (ISO 9712 и т.д.) и по собственной инициативе открывают проекты по разработке аналогичных систем.

СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ СИСТЕМЫ АТТЕСТАЦИИ ПЕРСОНАЛА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Быстрова Н.А., Галкин Д.И.
ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э.Баумана», Москва, Россия

В настоящее время вопрос обеспечения промышленной безопасности неразрывно связан с повышением и подтверждением квалификации (аттестацией) специалистов НК. Правильное использование методов и средств НК при изготовлении, эксплуатации и ремонте различных технических

устройств ответственного назначения является одним из способов обеспечения высокого уровня эксплуатационной безопасности данных объектов.

Чтобы исключить возможность допуска к данным работам некомпетентных специалистов в РФ была организована система аттестации, которая окончательно сформировалась в 2002 г. Для допуска к проведению НК требуется получение специального разрешения – квалификационного удостоверения, выдаваемого независимыми органами. В процессе аттестации проверяются навыки специалистов, позволяющие им качественно проводить соответствующие работы и получать достоверные результаты. Координирующий орган системы принимает решение о соответствии заявителя требованиям, предъявляемым документами системы аккредитации к независимым органам по аттестации.

Анализируя рынок услуг по аттестации (сертификации) персонала НК, авторы выделяют следующие проблемы:

- наличие Заказчиков, руководящихся при выборе независимого органа по аттестации лишь критерием минимальной стоимости;
- нежелание работодателя проводить подготовку кандидатов на аттестацию собственными силами;
- неустановившееся состояние системы технического регулирования в сфере НК и ПБ.

Решению первой проблемы может способствовать ужесточение ответственности специалистов НК за выдачу заведомо ложных заключений по результатам контроля. Подобная практика введена в системе экспертизы промышленной безопасности: поправки в № 116-ФЗ устанавливают административную и уголовную ответственность за выдачу экспертами заведомо ложных заключений. Столь серьезное наказание должно отрезвить руководителей экспертных организаций и предприятий, на базе которых созданы лаборатории НК. Качество подготовки собственных специалистов, уверенность в принимаемых ими решениях должна ставиться во главу угла. Авторы также считают, что положительный эффект может быть достигнут путем усиления надзора за независимыми органами, сокращения их количества и установления общественного контроля за их деятельностью.

Для решения второй проблемы, по мнению авторов, необходимо создавать специализированные учебные центры для специалистов НК. Чтобы кардинально не изменять существующую систему, можно организовывать такие центры на базе существующих независимых органов, которые имеют все необходимое для проведения подготовки (персонал, оборудование, учебные классы, образы). Процедуру аттестации кандидаты проходили бы в другом независимом органе.

Реализация данных мероприятий приведет к увеличению стоимости аттестации, но за большие деньги Заказчик будет получать реальную услугу по оценке квалификации, а не платить десятки тысяч за сертификат (удостоверение), стоимость изготовления которого не превышает и десяти рублей.

Для решения третьей проблемы необходимо законодательно установить основополагающие документы по НК, соблюдение которых обязательно на всех предприятиях. Отраслевая специфика не должна создавать новую ветвь нормативных документов, а должна ссылаться на решения, предлагаемые в основополагающих документах. В этом случае будет установлена единая терминология и обеспечено единство подходов к проведению НК и оценке качества.

Существующая система аттестации является жизнеспособной, однако за десять работы накоплен достаточный опыт для ее совершенствования и адаптации к реальным условиям. Авторы убеждены, что без устранения описанных в статье проблем невозможно нормальное функционирование системы и ее дальнейшее развитие.

К ВОПРОСУ О ПРОВЕДЕНИИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

Быстрова Н.А., Галкин Д.И.
ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана», Москва, Россия

Основным документом, регламентирующим в настоящее время изготовление металлоконструкции в заводских условиях, является ГОСТ 23118 «Конструкции стальные строительные. Общие технические условия». Схематичное изображение типового узла приварки раскосов к нижнему поясу сварной металлоконструкции приведено на рис. 1.

В настоящее время участились случаи рекламаций и судебных тяжб между заказчиками и изготовителями металлоконструкций, арбитром в которых становятся специалисты НК. В этой связи для получения достовер-



Рис. 1. Схематичное изображение узла сварной металлоконструкции

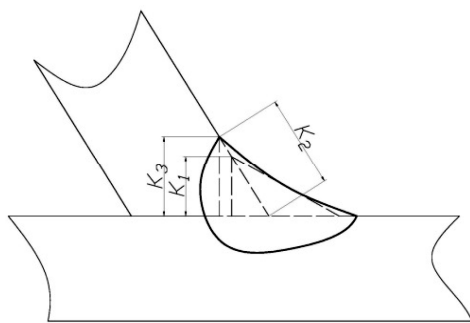


Рис. 2. Катет углового шва:

K_1 – по ГОСТ 14771, K_2 – по ГОСТ Р ИСО 17659, K_3 – по РД 03-606–03

ных результатов необходимо учитывать следующие особенности контроля сварных соединений элементов, расположенных под углом менее 90° :

1. Отсутствие в нормативной документации однозначного определения катета углового шва.

Так, например, ГОСТ 14771 «Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры», ГОСТ Р ИСО 17659 «Сварка. Термины многоязычные для сварных соединений» и РД 03-606–03 «Инструкция по визуальному и измерительному контролю» имеют различные определения катета углового шва, что проиллюстрировано на рис. 2.

2. Ограниченность применения стандартных средств контроля (определенных РД 03-606–03) для измерения катета углового шва (см. рис. 1) вследствие технической невозможности:

- правильной установки средств контроля;
- получения значения катета углового шва в результате прямого измерения.

3. Невозможность применения стандартных (регламентированных, например, в ГОСТ 14782, РД РОСЭК-001–96) схем и методик ультразвукового контроля для выявления наиболее опасных дефектов типа несплавления и непровара по причинам:

- наличия труднодоступных областей для сканирования: зоны с односторонним доступом, криволинейные поверхности;
- необходимости учета угла наклона элементов с целью определения зоны возможного приема отраженных от несплошностей сигналов;
- отсутствия регламентированных требований к настройке чувствительности контроля.

Авторы хотят предостеречь специалистов НК от имитации контроля рассматриваемых металлоконструкций, которая легко прослеживается в заключениях и технологических картах. В качестве путей решения поставленных задач авторы предлагают:

1. Перед проведением НК потребовать от проектной организации указания нормативного документа, в соответствии с которым проектанты принята трактовка катета углового шва.

2. При проведении визуального и измерительного контроля факультативно использовать контурные шаблоны, позволяющие воспроизвести на бумаге очертания наружной поверхности сварного шва, после чего выполнить измерения всех его параметров.

3. Перед проведением ультразвукового контроля разрабатывать технологическую карту, учитывающую особенности сварного соединения. Для контроля на предмет наличия непровара использовать схему из двух преобразователей (излучателя и приемника). Угол ввода излучающего преобразователя и расстояние между преобразователями необходимо определять исходя из геометрических размеров свариваемых элементов.

ОПЫТ И ПРОБЛЕМЫ ПОДГОТОВКИ «НУЦ «КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА» К ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В КАЧЕСТВЕ СТОРОННЕГО АГЕНТСТВА В СООТВЕТСТВИИ С АЭРОКОСМИЧЕСКИМ СТАНДАРТОМ EN 4179:2009

Волкова Н.Н., Муллин А.В., Стрижаков В.М., Каксис Ю.А.
«НУЦ «Контроль и диагностика», Москва, Россия

Вот уже без малого 20 лет «НУЦ «Контроль и диагностика» осуществляет деятельность по подготовке и сертификации персонала по неразрушающему контролю (НК) в соответствии с международными и российскими нормами.

Требования международных норм в последние годы определялись периодически обновляющимися редакциями стандартов EN 473 и ISO 9712, вместо которых с июня 2012 г. вышла действующая редакция стандарта ISO 9712:2012. Неразрушающий контроль. Квалификация и сертификация персонала [1], объединившая требования двух документов.

В последнее время возросло количество обращений в «НУЦ «Контроль и диагностика» о проведении сертификации персонала в соответствии с аэрокосмическим стандартом EN 4179:2009. Аэрокосмическая серия. Квалификация и утверждение персонала для неразрушающего контроля [2].

С этой целью от «НУЦ «Контроль и диагностика» была подана заявка в Британский орган по аккредитации (United Kingdom Accreditation Service –

UKAS) на аккредитацию в качестве Стороннего агентства, компетентного в проведении экзаменов по ультразвуковому (UT), магнитному (MT), вихретоковому (ET), визуальному (VT) и методу контроля проникающими (PT) в соответствии с EN 4179:2009.

Проверку на соответствие требованиям, предъявляемым данным стандартом к Сторонним агентствам, предполагалось совместить с очередным (ежегодным) инспекционным аудитом.

Подготовка к проверке аудиторами UKAS проводилась по трем основным направлениям:

- 1) стандарты, используемые в аэрокосмической промышленности при проведении неразрушающего контроля методами UT, MT, ET, VT и PT;
- 2) экзаменационные вопросы для специального экзамена;
- 3) экзаменационные образцы.

По первому направлению с целью создания базы для разработки технологических экзаменационных вопросов по методам UT, MT, ET, VT и PT в аэрокосмическом секторе нашими специалистами был определен перечень стандартов, определяющих технологию контроля этими методами. В результате были закуплены оригинальные редакции 8-ми стандартов на английском языке с последующим их переводом на русский язык.

По второму направлению штатными и привлекаемыми экзаменаторами «НУЦ «Контроль и диагностика», входящими в комиссии по методам UT, MT, ET, VT и PT были разработаны экзаменационные вопросы для специального экзамена, учитывающие специфику авиационной отрасли. Причем по ультразвуковому контролю кроме вопросов по собственно ультразвуковому методу были составлены вопросы по акустическому импедансному методу контроля, используемому (в числе прочих методов и способов НК) для выявления характерных дефектов многослойных (сотовых и композиционных) конструкций авиационной техники.

Всего было разработано и включено в действующий Сборник экзаменационных вопросов: по методу UT – 210 вопросов, по методу MT – 201 вопрос, по методу ET – 126 вопросов, по методу VT – 130 вопросов, по методу PT – 246 вопросов на 1, 2, 3 уровни квалификации.

По третьему направлению был осуществлен подбор и, в необходимых случаях, изготовление экзаменационных образцов, представляющих собой типовые детали, узлы и фрагменты конструкций авиационной техники.

Итогом достаточно напряженной работы стали положительные результаты инспекционного аудита представителями органа по аккредитации UKAS, прошедшего в период с 18 по 20 июня 2013 г.

Вместе с тем, у нас есть понимание, что сделаны лишь первые шаги в заданном направлении. «НУЦ «Контроль и диагностика» предстоит перейти к следующему этапу – подготовке к аккредитации Национальным аэро-

космическим советом по НК Великобритании (United Kingdom National Aerospace NDT Board – NA NDT B).

Для получения такой аккредитации необходимо соответствовать определенным критериям, которые изложены в документе этого органа: NANDTB/12. Оценка и аккредитация агентств, оказывающих услуги по проведению обучения и экзаменов в аэрокосмическом секторе, охватывающем EN 4179:2009. (Assessment and accreditation of agencies providing training and examination services to the aerospace sector covering EN 4179:2009) [3].

Наша организация уже соответствует части содержащихся там требований, но довольно существенная их часть обусловлена спецификой системы сертификации по аэрокосмическому стандарту.

Поэтому ближайшими дальнейшими шагами, по нашему мнению, будут являться:

- сертификация экзаменаторов «НУЦ «Контроль и диагностика» по EN 4179:2009 на 3 уровень по соответствующим методам;
- определение ответственного специалиста 3 уровня (Responsible Level 3), повышение его квалификации для подготовки к выполнению функций, определенных аэрокосмическим стандартом по сертификации персонала;
- разработка проекта Письменной процедуры (Written Practice) сертификации персонала, а в последствии – ее адаптация к условиям заинтересованного Работодателя (Employer) и согласование с ним с целью использования после юридического оформления договорных отношений в части оказания услуг Стороннего агентства по приему экзаменов.

При этом необходимо будет наладить тесное сотрудничество с Работодателем в целях корректировки, согласования и адаптации всех составляющих экзаменационного процесса (используемое оборудование и аппаратура для НК, специальные экзаменационные вопросы и экзаменационные образцы и др.) к требованиям, условиям и специфике процессов выполнения НК его персоналом и на его объектах. Аналогичный комплекс вопросов планируется решить и в отношении обучения.

Литература

1. **ISO 9712:2012.** Неразрушающий контроль. Квалификация и сертификация персонала.
2. **EN 4179:2009.** Аэрокосмическая серия. Квалификация и утверждение персонала для неразрушающего контроля.
3. **NANDTB/12.** Оценка и аккредитация агентств, оказывающих услуги по проведению обучения и экзаменов в аэрокосмическом секторе, охватывающем EN 4179:2009.

МНОГОСТОРОННЕЕ СОГЛАШЕНИЕ О ПРИЗНАНИИ МЕЖДУНАРОДНОГО КОМИТЕТА ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ ICNDT MRA – ДВИЖЕНИЕ К ГЛОБАЛЬНОЙ ГАРМОНИЗАЦИИ СЕРТИФИКАЦИИ ПО ISO 9712

Волкова Н.Н., Муллин А.В.
«НУЦ «Контроль и диагностика», Москва, Россия

Международный комитет по неразрушающему контролю ICNDT разработал и приступил к внедрению системы взаимного признания Органов по сертификации персонала в форме подписания Многостороннего Соглашения о признании MRA. Разработка принципов Соглашения проводилась Рабочей группой по квалификации и сертификации (ICNDT WG1). Управление процессом признания поручено Исполнительному Комитету по сертификации (ICES).

Многостороннее соглашение подписывается полными или ассоциированными членами ICNDT. Регистрации подлежат Органы по сертификации персонала стран-подписантов Соглашения. На сегодняшний день 26 стран мира подписали Соглашение.

Основные цели Соглашения:

– Гармонизация деятельности по сертификации персонала неразрушающего контроля во всех четырех регионах ICNDT: Европа, Азиатско-Тихоокеанский регион, Пан-Американский регион и Африка.

– Усиление признания независимой сертификации на основе единого международного стандарта ISO 9712.

– Улучшение свободы перемещения персонала и товаров через национальные границы.

– Уменьшение стоимости сертификации для персонала и организаций Страны- подписанты Соглашения, в которых отсутствует национальная система аккредитации в соответствии с ISO/IEC 17024, могут пройти процедуру оценки соответствия Органов по сертификации персонала в рамках ICNDT и иметь доступ к регистрации как признаваемый орган по сертификации.

ОБ ОПЫТЕ РАЗРАБОТКИ «НУЦ «КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА» ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО СТАНДАРТА «СПЕЦИАЛИСТ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»

Волкова Н.Н., Муллин А.В., Стрижаков В.М., Каксис Ю.А.
«НУЦ «Контроль и диагностика», Москва, Россия

В условиях интеграции России в мировую экономику одним из наиболее важных факторов национальной конкурентоспособности являются ква-

лифицированные человеческие ресурсы. Поэтому квалификация работников должна быть приведена в соответствие с изменяющимися квалификационными требованиями.

Профессиональный стандарт «Специалист по неразрушающему контролю» в ракетно-космической промышленности разрабатывается «НУЦ «Контроль и диагностика» с привлечением организаций ракетно-космической промышленности в целях реализации Указа Президента РФ от 7 мая 2012 г. № 597 «О долгосрочной государственной экономической политике» [1], распоряжения Правительства РФ от 29.11.2012 № 2204-р «Об утверждении плана разработки профессиональных стандартов на 2012 – 2015 годы» [2] и других нормативных правовых актов.

Профессиональный стандарт «Специалист по неразрушающему контролю» разрабатывается для:

- обеспечения взаимодействия сферы труда и системы образования; поддержки непрерывности профессионального развития работников в течение всей трудовой деятельности; учета требований рынка труда при разработке образовательных стандартов и программ обучения, в том числе модульных, экзаменационных требований;

- унификации, установления и поддержания единых требований к содержанию и качеству профессиональной деятельности, определения квалификационных требований к работникам; прозрачности подтверждения и оценки профессиональной квалификации работников, выпускников учреждений профессионального образования;

- совершенствования деятельности по подбору подходящей работы, профессиональной ориентации населения;

- оценки качественных и количественных изменений на рынке труда, регулирования трудовых ресурсов, согласования требований рынка труда и развития сферы профессионального образования и обучения.

В соответствии с приказом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 12 апреля 2013 г. № 148н [3] в целях разработки проектов профессиональных стандартов установлены девять (с 1-го по 9-й) уровней квалификации, в зависимости от полномочий и ответственности работника.

Профессиональный стандарт содержит три обобщенные трудовые функции, относящиеся в соответствии с отечественными и международными документами по аттестации (сертификации) специалистов по неразрушающему контролю (НК), к специалистам 1-го, 2-го и 3-го уровней квалификации. В соответствии с вышеупомянутым приказом Минтруда № 148н эти функции отнесены к 3-му, 4-му и 6-му уровням квалификации соответственно.

Положения данного профессионального стандарта основаны на требованиях международного стандарта ISO 9712:2012 [4], что имеет целью спо-

способствовать гармонизации требований к персоналу по НК, предъявляемых международными и отечественными документами.

Приведем наименование обобщенных трудовых функций и содержащиеся в них трудовые функции:

1. Выполнение работ по неразрушающему контролю конкретного объекта заданным методом в соответствии с технологической инструкцией (3-й уровень квалификации):

- подготовка к проведению НК;
- проведение НК;
- оформление результатов НК.

2. Выполнение работ по неразрушающему контролю широкого диапазона различных объектов с выдачей заключения (4-й уровень квалификации):

- разработка технологических инструкций (технологических карт);
- подготовка к проведению НК;
- проведение НК;
- оценка результатов НК в соответствии с применяемыми стандартами и нормативными документами;
- оформление результатов НК;
- руководство специалистами 3-го уровня квалификации.

3. Организация и руководство выполнением работ по неразрушающему контролю (6-й уровень квалификации):

- планирование, организация и руководство работами по НК;
- контроль и анализ;
- выполнение трудовых функций специалиста 4-го уровня квалификации;
- разработка, корректировка и утверждение нормативной документации по НК.

Каждая трудовая функция содержит трудовые действия, формирующие ее содержание и перечень знаний и умений, необходимых для их качественного выполнения.

Полный текст проекта профессионального стандарта «Специалист по неразрушающему контролю» в ракетно-космической промышленности для общественного обсуждения представлен на сайте нашей организации: www.ndt-rus.ru.

В ходе разработки проекта профессионального стандарта было проведено анкетирование организаций ракетно-космической промышленности, сбор, анализ и систематизация замечаний и предложений по совершенствованию проекта профессионального стандарта, проведение межрегионального круглого стола с участием представителей организаций отрасли. В ходе этих мероприятий удалось учесть отраслевые и профессиональные особенности деятельности специалиста по НК в ракетно-космической промышленности при доработке проекта стандарта.

Необходимо отметить, что работники, работодатели, образовательные учреждения системы профессионального образования, органы исполнительной власти, имея профессиональные стандарты, получают ряд преимуществ:

- стандарты предоставляют возможность работникам определить свой профессиональный уровень и улучшить профессиональные знания, повысить квалификацию, пройти аттестацию, получить основу для дальнейшего профессионального роста;

- стандарты позволяют работодателям оценить и повысить профессионализм своих работников, активизировать мотивацию, добиться эффективности и качества труда, а следовательно высоких экономических результатов в организации;

- стандарты позволяют контролировать профессионализм работников, занятых в отдельных видах экономической деятельности, корпорациях, организациях, поддерживать и улучшать отраслевые стандарты качества;

- для органов исполнительной власти, отвечающих за трудовые ресурсы, профессиональные стандарты дают возможность содействовать формированию политики в сфере труда и обучения работников, формированию профессионально-квалифицированного состава трудовых ресурсов с учетом региональных особенностей;

- для образовательных учреждений системы профессионального образования, стандарты дают возможность создать основу для разработки учебных программ и методических материалов, основу для системы оценки качества обучения, аттестации, развития системы профессионального обучения.

Литература

1. **О долгосрочной** государственной экономической политике: указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2012 г. № 597.

2. **Об утверждении** плана разработки профессиональных стандартов на 2012 – 2015 годы: распоряжение Правительства Российской Федерации от 29.11.2012 № 2204-р.

3. **Об утверждении** уровней квалификации в целях разработки профессиональных стандартов: приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 12 апреля 2013 г. № 148н.

4. **ISO 9712:2012.** Неразрушающий контроль. Квалификация и сертификация персонала.

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Иванов В.И., Коновалов Н.Н., Дергачев А.Н.
ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность», Москва, Россия

Достоверность контроля является важнейшим показателем его эффективности. Точное определение размеров дефектов лежит в основе безопас-

ной и безаварийной работы всех узлов опасных производственных объектов. В идеале после проведения неразрушающего контроля в сварных соединениях не должно остаться дефектов с размерами, превышающими допустимые. Однако на практике существует вероятность того, что дефект не будет выявлен или, что его размеры будут неверно определены. Это является следствием ряда причин: особенности метода контроля, специфика используемого оборудования и др. Таким образом, точная оценка достоверности необходима для дальнейшего анализа опасности объекта.

В настоящее время широкое развитие получили три направления оценки достоверности неразрушающего контроля: кривые POD (probability of detection) и ROC (receiver operation characteristics) и матрицы оценки достоверности, где метод неразрушающего контроля сравнивается с образцовым методом (как правило, это вскрытие швов).

Кривые POD ориентированы на оценку выявляемости дефектов различного размера тем или иным методом неразрушающего контроля. Кривые ROC позволяют оценить соотношение верных и ложных локаций дефектов. Таким образом, используя данные кривые, можно определить вероятность пропуска дефекта, обусловленного особенностями оборудования и метода контроля.

Построение матрицы достоверности позволяет учитывать возможные ошибки при разделении дефектов на годные и негодные, что позволяет оценить вероятность ошибки с позиций перебраковки и недобраковки.

ОЦЕНКА КОМПЕТЕНТНОСТИ СПЕЦИАЛИСТОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В СООТВЕТСТВИИ С ПБ 03-440-02 И ДОКУМЕНТАМИ СДСПНК РОНКТД

Коновалов Н.Н., Дергачев А.Н.
ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность», Москва, Россия

Аттестация персонала, выполняющего неразрушающий контроль (НК) технических устройств, зданий и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах, осуществляется в соответствии с ПБ 03-440-02 «Правила аттестации персонала в области неразрушающего контроля». Данный документ регламентирует порядок аттестации, требования к квалификационным экзаменам, требования к общей и специальной подготовке кандидатов на аттестацию. Перечень объектов НК в соответствии с ПБ 03-440-02 включает: объекты котлонадзора, системы газоснабжения, подъемные сооружения, объекты горнорудной и угольной промышленности, оборудование нефтяной и газовой промышленности, оборудование металлургической промышленности и другие объекты, которые традиционно были подконтрольны Госгортехнадзору России. С создания Ростехнадзора, в его состав были включены строительный надзор и

энергоназор. Соответственно, в 2006 г. в перечень объектов НК были включены здания и сооружения и объекты электроэнергетики.

Система НК согласно ПБ 03-440-02 охватывает следующие виды (методы) контроля: ультразвуковой, акустико-эмиссионный, радиационный, магнитный, вихретоковый, электрический, оптический, вибродиагностический, тепловой, проникающими веществами и визуально-измерительный. В соответствии с п. 1.7 ПБ 03-440-02 (в котором указано, что настоящие Правила могут быть применены и к другим методам НК при наличии соответствующей документации и квалификационных требований), принято «Положение об аттестации персонала в области неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния» (СДОС-05-2010). С введением Положения внесены изменения в перечни областей аккредитации независимых органов, и в перечни методов (видов) НК, по которым проводится аттестация. Добавлен п. 12 – контроль напряженно-деформированного состояния.

Функционируют 36 Независимых органа по аттестации персонала в области НК, 27 из которых аккредитованы на право проведения аттестации персонала в области НК строительных объектов, 7 – в области НК оборудования электроэнергетики и 3 – в области НК напряженно-деформированного состояния. Более 50 % Независимых органов выполняют работы не менее чем в 5 отраслях надзора по 6 видам (методам) НК. В реестр Системы НК внесено около 52 000 аттестованных специалистов.

Российским обществом по неразрушающему контролю и технической диагностике (РОНКТД) и ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность» 31.08.2011 подписано соглашение о сотрудничестве. Его основной задачей является формирование условий для создания в России единой системы сертификации персонала в области НК, признаваемой на международном уровне. В соответствии с соглашением ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность» проводит признание органов по сертификации персонала в области неразрушающего контроля Системы добровольной сертификации персонала в области неразрушающего контроля и диагностики РОНКТД (СДСПНК).

В рамках СДСПНК проводится сертификация персонала в области НК в следующих промышленных секторах: авиация, объекты аэрокосмического комплекса, объекты морского и речного регистров (включая объекты инфраструктуры), объекты железнодорожного транспорта (включая подвижной состав и объекты инфраструктуры), здания и сооружения, объекты энергетики и общепромышленные объекты.

Управляющим советом СДСПНК 11.02.2013 утвержден комплект новых документов, включающий документы, регламентирующие деятельность основных участников СДСПНК, документы, устанавливающие требования к органам по сертификации и специалистам, которые осуществляют проверки органов по сертификации, а также Правила сертификации персонала в области неразрушающего контроля (с учетом требований ISO 9712:2012). Начата работа по признанию органов по сертификации СДСПНК с учетом новых требований.

КОМПЬЮТЕРИЗАЦИЯ СРЕДСТВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ЕГО МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Коновалов Н.Н.

ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность», Москва, Россия

Развитие электроники дает потребителям широкий выбор наукоемких средств неразрушающего контроля (НК) по различным методам контроля. Интенсивная компьютеризация средств НК привела к высокому уровню их интеллектуализации. В настоящее время прибор НК это часто компьютеризованное средство, предлагающее пользователю широкий набор сервисных услуг, связанных с вычислительной обработкой данных НК.

Среди основных тенденций развития средств НК можно отметить следующие: объективную информацию более высокого уровня о состоянии контролируемого объекта, в ряде случаев, дают комплексные методы, интегрированные по различным физическим эффектам; встроенные системы технического диагностирования все больше становятся составной частью сложных технических объектов; широкое применение находит перевод дефектоскопической информации в двух или трехмерное изображение; организациями-разработчиками предлагается целый ряд средств цифровой обработки радиографических изображений; значительно возросли объемы использования при НК лазерных технологий; все большее применение находят дефектоскопические приемы, позволяющие производить ранжирование выявленных дефектов по их опасности и использовать специальные информационные признаки обнаруженных дефектов для отбраковки наиболее значимых дефектов; широко внедряются бесконтактные способы ультразвукового контроля, ультразвуковое оборудование, позволяющее производить предварительные настройки и сохранять их, документировать результаты контроля, а также ультразвуковые приборы, применяющие антенные решетки. Следует учитывать, что экономические причины в ряде случаев могут диктовать необходимость применения недорогих средств НК, имеющих ограниченные сервисные возможности, но простых и надежных в оценке результатов НК. Необходимо принимать во внимание, что в наибольшем объеме будут продолжать применяться традиционные методы НК, для которых созданы фундаментальные теоретические основы и эффективные технологические приемы использования.

Развитие нормативно-методического обеспечения НК существенно отстает от темпов совершенствования средств НК. Значительная часть применяемых методик устарела. До сих пор используются методики, разработанные 30 лет и более тому назад. Отставание нормативно-методического обеспечения не только затрудняет внедрение современных средств НК, но и отрицательно сказывается на оснащении лабораторий и подготовке специалистов НК. Проверка организационно-технической готовности лаборатории осуществляется исходя из заявленной области ее аттестации.

При проверке устанавливаются методические документы, которые регламентируют проведение НК заявленных объектов. Какими средствами должна располагать лаборатория определяется соответствующими разделами этих методических документов. В итоге устаревшие методики диктуют необходимость наличие в лабораториях устаревшего дефектоскопического оборудования. При аттестации специалист НК должен сдать специальный экзамен на знание методик НК. Так как методики устарели, то в итоге аттестация специалистов ориентирована на устаревшие технологии и средства НК.

Разработкой нормативно-методических документов в области НК занимается большое количество отраслевых министерств. С прекращением их деятельности выполнение работ по разработке методик НК в основном легло на организации, осуществляющие НК. Разработка методик НК сложная и ответственная работа особенно таких важных объектов, как технические устройства, здания и сооружения, применяемые и эксплуатируемые на опасных производственных объектах. Целесообразно разрабатывать такие документы не в одиночку, а – коллективом, в котором собраны ведущие в конкретной области специалисты. При этом может быть полезно применение процедур аттестации методических документов по НК. В этой связи ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность» продолжит разработку документов по НК в рамках Единой системы оценки соответствия в области промышленной экологической безопасности, безопасности в энергетике и строительстве.

О ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ОБЛАСТИ АТТЕСТАЦИИ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО УЛЬТРАЗВУКОВОМУ КОНТРОЛЮ

Коновалов Н.Н.¹, Мелешко Н.В.²

¹ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность», Москва, Россия;

²НУЦ «КАСКАД» МГУПИ, Москва, Россия

В докладе рассмотрены сложности, с которыми встречаются специалисты независимых органов по аттестации персонала (НОАП), в частности, при подготовке специалистов по ультразвуковому виду неразрушающего контроля.

Отмечены:

- отсутствие часто производственного опыта у желающих стать кандидатами;
- большое количество нормативно-методических документов, не соответствующих современным требованиям (например, некоторые методики написаны под аналоговые приборы типа УД2-12);
- недостаточно нормативно-методических документов на объекты по некоторым пунктам аттестации;
- в независимых органах по аттестации персонала часто нет или мало некоторых приборов (например, низкочастотных) и образцов для прове-

дения практических экзаменов по ультразвуковому контролю бетонных конструкций, объектов железнодорожного транспорта;

– в связи с отсутствием нормативно-методической документации на технологии ФАР, TOFD и др., – не проводится подготовка по программам, содержащим эти технологии.

Предложены пути решения по вопросу обучения и аттестации слушателей без производственного опыта (при условии внесения соответствующих изменений в порядок аттестации):

1. Слушателей без опыта работы направлять на «первичное обучение», которое должно длиться не менее двух недель. Оно должно включать как теоретические основы, так и не менее половины времени должно отводиться практическим занятиям. Необходим большой парк разнообразных образцов для проведения контроля. Обучение целесообразно осуществлять в вузах, которые обучают по направлению «неразрушающий контроль» и смежным направлениям. Необходимо шире использовать профессиональные знания вузовских преподавателей и их помощников (ассистентов, аспирантов, магистров), чтобы проводить обучение.

2. После первичной подготовки слушателя допускать к сдаче экзаменов на 1 уровень.

3. 2 уровень специалист может получить только после реального практического опыта и наличия квалификационного удостоверения 1 уровня.

Для проведения практических занятий, а также курсов повышения квалификации при ведущих вузах предлагается создание «Образовательных центров по неразрушающему контролю».

При создании Образовательного центра при вузе должно учитываться:

1. Существование в вузе аттестованной лаборатории, оснащенной необходимыми нормативно-методическими документами и оборудованием:

- приборами;
- образцами;
- установками для моделирования полевых условий.

2. Наличие необходимого опыта у вузовских преподавателей:

– знание нормативно-методических документов;

– умение преподавать не только студентам, но и специалистам без высшего образования;

– умение разрабатывать методики контроля;

– умение проводить исследования на современном оборудовании.

3. Возможность использования свободных оборудованных техникой аудиторий для занятий.

Сформулированы необходимые требования к Образовательным центрам и показана их экономическая выгода.

Обоснована возможность создания Образовательных центров в вузах.

Вынесено на обсуждение изменение в требованиях к кандидату при аттестации на 1 уровень.

ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ ВСЕРОССИЙСКИХ КОНКУРСОВ СПЕЦИАЛИСТОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Копытов С.Г., Батов Г.П.
ООО «НУЦ «Качество», Москва, Россия

Российское общество неразрушающего контроля и технической диагностики ежегодно проводит Всероссийские конкурсы специалистов неразрушающего контроля.

Конкурсы проводятся при поддержке Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. Организация конкурсов возложена на ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность» и ООО «НУЦ «Качество» (совместно с ОАО «НИКИМТ-Атомстрой»)

Ежегодно в конкурсе принимают участие сотни аттестованных специалистов со всех концов Российской Федерации: от Калининграда до Владивостока, от Северодвинска до Сочи.

Главная задача конкурса специалистов неразрушающего контроля – повышение профессионального мастерства и популяризации профессии специалистов неразрушающего контроля и, как следствие, вклад в обеспечение высокого уровня безопасности в промышленности, энергетике, строительстве.

Участие в конкурсе серьезно повышает уровень подготовки специалистов, так как любой человек, готовясь доказать, что он лучший, обязательно постарается подготовиться к состязанию.

Организационный комитет конкурса возглавляет президент РОНКТД.

Конкурс проводится по следующим методам неразрушающего контроля: акустико-эмиссионному, визуальному и измерительному, магнитному, проникающими веществами (капиллярному), радиографическому, тепловому и ультразвуковому. С 2014 г. оргкомитетом принято решение проводить конкурс и по вибродиагностическому методу контроля.

Конкурс проводится в два этапа: отборочный и финальный туры.

Жюри 1-го тура Конкурса для каждого метода в каждом из региональных центров по проведению конкурса состоит из:

- двух специалистов III уровня по соответствующему методу;
- представителя Ростехнадзора.

В состав жюри 2-го тура Конкурса дополнительно входит третий специалист III уровня по соответствующему методу.

Исключается участие в жюри по одному методу более одного представителя от одной организации.

Каждый специалист III уровня имеет право участвовать в жюри только по одному методу.

Членом жюри по методу не может быть представитель организации, направившей конкурсанта(ов) на тот же метод.

Первый тур (отборочный) проводится на региональном уровне Органами по сертификации персонала, аккредитованными в системе СДСПНК РОНКТД, Независимыми органами по аттестации персонала Единой системы оценки соответствия в области промышленной безопасности, безопасности в энергетике и строительстве (ЕС ОС) или их экзаменационными центрами.

Условием участия НОАП/ОС или их ЭЦ в проведении 1-го тура Конкурса является наличие:

- аккредитации в качестве ОС в системе СДСПНК РОНКТД или НОАП в ЕС ОС;
- оснащенных рабочих мест (не менее 5) по каждому заявленному методу НК для проведения практической части Конкурса;
- необходимого количества конкурсных образцов с учетом количества конкурсантов.

Каждый тур Конкурса состоит из двух частей: теоретической и практической.

В отборочном туре конкурса проверка теоретических знаний специалиста НК проводится по блокам вопросов по физическим основам метода, основным параметрам и технологиям проведения контроля. Участникам Конкурса выдаются одинаковые блоки из сорока вопросов по каждому методу НК. На каждый вопрос дается 4 варианта ответа, один из которых правильный, а остальные неправильные или неполные.

Норматив времени для ответов на конкурсные вопросы – 60 мин.

В практической части Конкурса участники проводят контроль двух конкурсных образцов с разработкой технологической карты.

Рабочие места для практической части экзамена должны быть оснащены в соответствии с требованиями техники безопасности, электробезопасности, промсанитарии и содержать полный комплект приборов, оборудования, средств, инструментов и материалов, необходимых для проведения контроля.

Перед началом Конкурса участники имеют возможность ознакомиться с аппаратурой и инструментами, необходимыми для проведения практической части Конкурса (допускается применение собственной аппаратуры при условии работы в ручном режиме).

Отсчет времени выполнения конкурсного задания ведется с момента начала работы участника до подачи им условного сигнала о завершении работы. Нормативное время выполнения практической части конкурсной работы установлено в зависимости от метода НК и составляет, например, по ультразвуковому контролю – 4 ч.

Учет времени выполнения конкурсных заданий ведется в таблице учета времени по каждому методу контроля. За превышение общего времени (суммируется время, затраченное конкурсантом на выполнение теоретической и практической частей Конкурса) начисляются штрафные баллы.

Результаты теоретической и практической частей Конкурса отражаются в таблице подведения итогов по каждому методу контроля в баллах.

Участники отборочного тура, занявшие:

I место при количестве конкурсантов до 5-ти человек;

I и II место при количестве конкурсантов от 6-ти до 10-ти человек;

I, II и III место при количестве конкурсантов более 10-ти человек, получают право участия в финальном туре Конкурса.

Второй тур (финальный) проводится на базе ООО «НУЦ «Качество» при участии специалистов ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность», ОАО «НИКИМТ-Атомстрой» с привлечением в качестве членов жюри ведущих специалистов других организаций.

Теоретическая часть финального тура состоит из ответов:

а) на 40 вопросов общего экзамена на знание физических основ метода повышенной сложности (норматив времени на выполнение – 60 мин.);

б) на 20 вопросов по технологии контроля, требующих развернутого письменного ответа (норматив времени на выполнение – 120 мин.).

Практическая часть предполагает разработку рабочей технологической инструкции по проведению контроля. Нормативное время выполнения – 4 ч.

Организациям, направившим своих специалистов на конкурс, вручается Свидетельство участника Всероссийского конкурса специалистов неразрушающего контроля.

Участники конкурса награждаются Грамотами участника.

Участникам отборочного тура, занявшим I, II и III места, вручаются соответствующие дипломы, ценные призы, а также предоставляется возможность продления срока действия квалификационных удостоверений в НОАП НУЦ «Качество» без оплаты.

Участникам финального тура, занявшим I, II и III места, вручаются соответствующие дипломы, ценные призы, а также предоставляется возможность пройти аттестацию на III уровень квалификации в НОАП «НУЦ «Качество» с учетом результатов финального тура конкурса.

ОБУЧЕНИЕ И СЕРТИФИКАЦИЯ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ В ИЖГТУ ИМЕНИ М.Т. КАЛАШНИКОВА

Муравьев В.В.

*Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова, г. Ижевск, Россия*

В 1978 г. Госкомитет по науке и технике СССР принял решение по развитию новых и перспективных средств и методов неразрушающего контроля и открытию соответствующей учебной специальности для получения высшего образования. В число вузов страны, где предполагалось открытие специальности, был включен и Ижевский механический институт. В 1981 г.

проведен первый набор 27 студентов на специальность 0653 «Физические методы и приборы неразрушающего контроля» с квалификацией выпускников инженер-физик.

Уже более четверти века кафедра «Приборы и методы контроля качества» ИжГТУ готовит специалистов в области приборов и методов неразрушающего контроля, технической и медицинской диагностики. За этот период подготовлено более 1 тысячи специалистов, которые успешно трудятся на предприятиях Удмуртии – ОАО ИРЗ, ОАО ИМЗ «Аксион-холдинг», ФГУП ИМЗ, ОАО ИЭМЗ «Купол», ОАО Ижсталь, ОАО Ижмаш, ОАО Буммаш, ОАО Нефтемаш, ОАО ЧМЗ, ФГУП Воткинский завод; в академических организациях – ФТИ УрО РАН, ИМ УрО РАН, ИФМ УрО РАН, в организациях ООО Газнадзор, ООО Пермтрансгаз, ООО ЭНТЭ, ЗАО «Альтон», ООО «Стрела» и др.

Среди выпускников кафедры 2 доктора и 22 кандидата наук, руководители промышленных предприятий и организаций, лабораторий неразрушающего контроля, центральных заводских лабораторий, отделов технического контроля и метрологии.

В настоящее время на кафедре трудятся 5 докторов и 12 кандидатов наук. Сегодня на кафедре функционируют 7 учебных и 3 научные лаборатории, оснащенные современными приборами и оборудованием, в которых обучаются бакалавры по направлению 200100 «Приборостроение», магистранты по программам 200100.68 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» и «Приборы, системы и изделия биомедицинского назначения».

При кафедре действует аспирантура по специальностям: «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий», «Методы контроля и диагностика в машиностроении», «Приборы и методы измерений по видам измерений», «Приборы, системы и изделия медицинского назначения», «Геоэкология».

Разработки кафедры внедрены на различных промышленных предприятиях региона и России. Среди внедренных разработок следует отметить акустические дефектоскопы насосных штанг (АДНШ), насосно-компрессорных труб (АДНКТ), прутков (АДП) и эхолоты ЭХО-2, основанные на новой технологии акустической дефектоскопии протяженных объектов, магнитометры ИГМП-3, толщинометры упрочненных слоев СКИФ-3, приборы для разбраковки по маркам стали ТЕРМ-1.

В 2008 г. в Ижевском государственном техническом университете организован Уполномоченный орган и экзаменационный центр по сертификации персонала в области неразрушающего контроля технических объектов железнодорожного транспорта в соответствии с «Правилами сертификации персонала по неразрушающему контролю технических объектов железнодорожного транспорта». Это пятый уполномоченный орган в России, работающий по правилам ПР 32.113. Центр прошел аккредитацию Ростех-

регулирования и головной организации ОАО РЖД «НК-центр» в ноябре 2008 г. (РССП рег. № РОСС RU.0001.03Н300 О-23; ССПНК ЖТ.УО № 005) и расширение области аккредитации в ноябре 2010 г.

Область сертификации – акустический (ультразвуковой), акустико-эмиссионный, магнитный и вихретоковый виды (методы) контроля в секторах железнодорожного транспорта и машиностроения и металлопроизводства. Среди объектов железнодорожного транспорта – вагоны, локомотивы, металлические сварные мосты, рельсы и стрелочные переводы в эксплуатации и при изготовлении.

Центр оснащен необходимыми экзаменационными образцами с естественными и искусственными моделями дефектов и необходимым количеством дефектоскопов для проведения практических экзаменов. Экзаменационный центр располагается в шести помещениях общей площадью 130 м². В Центре работают по 3 специалиста 3-го уровня по каждому виду контроля и специалисты 2-го уровня по соответствующим видам и объектам контроля.

Большинство специалистов, прибывающих на сертификацию, работают на предприятиях вагонного хозяйства. Это второй центр в России, занимающийся аттестацией специалистов по акустико-эмиссионному контролю литых деталей в вагонном хозяйстве, поэтому наибольший объем сертификаций приходится на этот метод.

По каждому виду контроля планируется от двух до четырех сертификаций в год. Перед экзаменами проводятся консультации в объеме 40 ч, затем три экзамена – теоретический, специальный и практический. После теоретического и специального экзаменов комиссия проводит собеседование индивидуально с каждым претендентом.

За 5 лет работы УОСП к 2013 г. к сертификационным экзаменам по заявленным видам контроля было допущено более 1 тысячи специалистов от ремонтных предприятий железных дорог, а также предприятий, производящих новые изделия для железнодорожного транспорта (рис. 1, а). На I уровень сертифицированы 92 дефектоскописта (10,7 %), на II – 720 (83,7 %), не прошли сертификационные испытания – 48 человек (5,6 %). По акустическому (УЗК) виду на II уровень сертифицировано 146 дефектоскопистов (18 % претендентов от общего числа сертифицированных); по акустико-эмиссионному (АЭК) – 285 (40 %); по магнитному (МК) – 175 (18 %), по вихретоковому (ВТК) – 193 (24 %) (рис. 1, б).

Часть дефектоскопистов не подтверждают квалификацию в процессе сертификации после подготовки и повышения квалификации в таких учебных центрах, как «Микроакустика-М» (Москва), Нижегородская техническая школа (НТШ), Саратовский ж.-д. техникум, Самарский университет путей сообщения и др. (рис. 2).

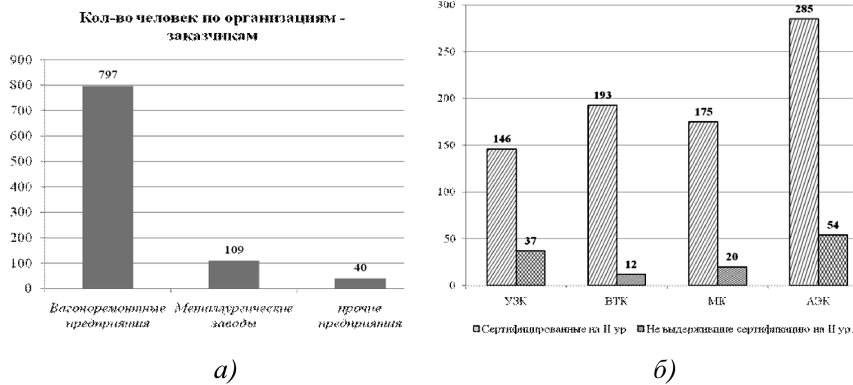


Рис. 1. Распределение сертифицированных специалистов по предприятиям (а), по видам НК (б)

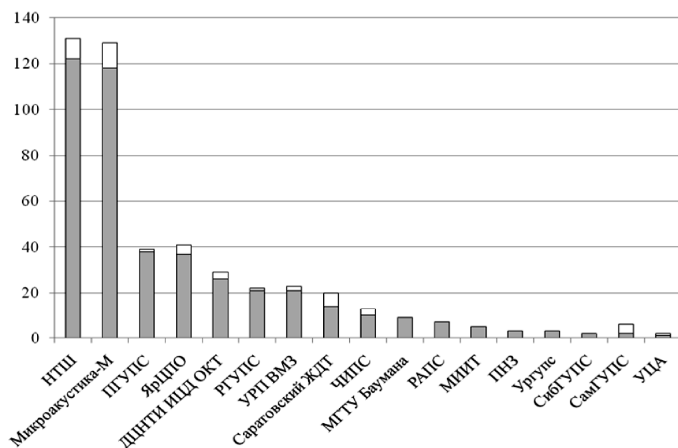


Рис. 2. Распределение специалистов по учебным центрам, выдержавших сертификацию и не сдавших экзамены

Результаты пятилетней сертификации в УОСП по видам неразрушающего контроля деталей вагонов и локомотивов, рельсов, объектов машиностроения показали востребованность предоставляемых услуг. За 5 лет работы УОСП на I уровень сертифицированы 92 дефектоскописта (10,7 %), на II – 720 (83,7 %), не сдали экзамены – 48 (5,6 %). По акустическому (ультразвуковому) виду на II уровень сертифицировано 146 дефектоскопистов (18 % претендентов); по акустико-эмиссионному – 285 (40 %); по магнитному – 175 (18 %), по вихретоковому – 193 (24 %). Наибольший процент сдачи сертификационных экзаменов при стаже работы дефектоскопи-

стов свыше 6 лет. Высокий процент сдач экзаменов дефектоскопистами после высшего образования и специального в техникумах.

Адрес Уполномоченного органа: 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7. (УОСП).

Адрес Центра: 426069, г. Ижевск, ул. 30 лет Победы, 30.

Электронный адрес: uosp@mail.ru. Телефон, факс (3412)588897, (3412)618281.

Работа выполнена при частичной поддержке:

Программы инициативных проектов фундаментальных исследований, выполняемых в Учреждении УрО РАН в 2012 – 2014 гг. (регистрационный номер: 12-У-2-1013);

Программы стратегического развития Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашникова на 2012 – 2016 годы (ПСР/М2/Н2.5/МВВ).

РАЗРАБОТКА, ВЫПУСК И ПЕРЕДАЧА НА АЭС УЧЕБНЫХ ПОСОБИЙ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ И АТТЕСТАЦИИ КОНТРОЛЕРОВ ПО НЕРАЗРУШАЮЩИМ И РАЗРУШАЮЩИМ МЕТОДАМ КОНТРОЛЯ

Полковников А.В., Горбачев В.И.

ОАО «НИКИМТ-Атомстрой», Москва, Россия

Доклад посвящен организации работ по подготовке и аттестации контролеров по неразрушающим и разрушающим методам контроля в соответствии с Правилами и нормами в атомной энергетике.

Необходимым условием подготовки и аттестации контролеров является наличие учебных пособий и экзаменационных образцов.

Разработанные ОАО «НИКИМТ-Атомстрой» учебные пособия для аттестационных комиссий атомных электростанций предназначены для следующих методов контроля:

- визуальный и измерительный контроль;
- капиллярный контроль;
- радиографический контроль;
- ультразвуковая дефектоскопия;
- ультразвуковая толщинометрия;
- магнитопорошковый контроль;
- контроль герметичности;
- металлография;
- стилоскопирование.

По каждому методу контроля в состав учебного пособия входят:

- плакаты, отражающие физические принципы контроля;

- альбом с фотографиями и схемами характерных несплошностей, выявляемых при контроле;
- пластиковая карта с актуальной информацией по основным параметрам контроля;
- аналитический обзор о преимуществах и недостатках каждого метода контроля.

Изготовленные учебные пособия используются при проведении обучения и аттестации контролеров на АЭС ОАО «Концерн Росэнергоатом» (Белоярская, Билибинская, Калининская, Кольская, Курская, Ленинградская, Нововоронежская, Ростовская, Смоленская, Балаковская АЭС).

Указанные учебные пособия соответствуют требованиям отечественных и международных систем по аттестации персонала по неразрушающим и разрушающим методам контроля.

ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С ЭКЗАМЕНАЦИОННЫМИ ЦЕНТРАМИ ОРГАНА ПО СЕРТИФИКАЦИИ ПЕРСОНАЛА В СООТВЕТСТВИИ С ISO 17024 И ISO 9712

Соловьева М.О., Пономарева И.Н.
ООО «НУЦ «Качество», Москва, Россия

Орган по сертификации (ОС) НУЦ «Качество» имеет большой опыт (около 10 лет) работы по созданию и организации работы экзаменационных центров и имеет в своей структуре признанные экзаменационные центры, как отраслевые, так и региональные.

В ISO 9712:2012 «Неразрушающий контроль – Квалификация и сертификация персонала по неразрушающему контролю» содержится следующее определение: **экзаменационный центр** – центр, признанный органом по сертификации для проведения квалификационных экзаменов.

В данный момент хотелось пояснить особенности региональных и отраслевых центров, хотя их названия уже сами говорят за себя.

Отраслевые экзаменационные центры – это центры, которые имеют ряд особенностей работы в отраслях, например таких как, авиация и космонавтика, судостроение и судоходство, железнодорожный транспорт, нефтяная и газовая промышленность и другие отрасли промышленности.

Совместная деятельность Органа по сертификации и специализированных центров, открытых на базе предприятий являющихся лидерами в своей отрасли, позволяет повысить качество и профессионализм при подготовке программ обучения, сборников специальных экзаменационных вопросов, технологий контроля, учитывать особенности работы в конкретной области. Проведение работ в таких экзаменационных центрах позволяет провести подготовку на более высоком уровне и наиболее близко к ре-

альной практике, а так же более объективно оценить компетентность специалистов сдающих экзамены с целью сертификации. Так же работа с такими центрами позволяет создавать парк экзаменационных образцов характерных для каждого сектора и содержащих дефекты, встречающиеся в конкретном производстве.

Все это приводит к повышению качества работ по сертификации, как в экзаменационном центре, так и в Органе по сертификации, так как позволяет учитывать (использовать) производственный опыт работы экзаменационного центра и опыт работы по сертификации Органа по сертификации.

Региональные экзаменационные центры – это центры, расположенные в регионах и позволяющие сдавать экзамены наиболее близко к месту жительства и к месту работы, а не ехать в Москву.

Применение единых программ подготовки, единых сборников экзаменационных вопросов, бланков, единый процесс оценки, обеспечивают единый подход к приему экзаменов во всех экзаменационных центрах, признанных при Органе по сертификации НУЦ «Качество»

Рассмотрим организацию работы с экзаменационными центрами в нашем органе. Все экзаменационные центры, признанные при ОС «НУЦ «Качество» работают по единой системе менеджмента качества, т.е. по единым процедурам, разработанным нашими специалистами.

Все экзаменационные центры признаются и работают в соответствии с документом «Положение об экзаменационном центре, организованном при независимом органе по сертификации (аттестации) персонала, порядок признания». В данном документе приведены все требования к экзаменационному центру, в том числе и технические требования (к оборудованию и вспомогательным средствам контроля), требования к помещениям, порядок признания, порядок работы и порядок проведения аудитов, формы отчетности и т.д.

Всем нашим центрам передаются и внедряются следующие документы системы качества:

- Управление документами системы качества.
- Процесс подготовки, проведения и оформления результатов квалификационных экзаменов по НК.
- Порядок учета, применения и обновления экзаменационных образцов; требования к экзаменационным образцам.
- Управление организационно-распорядительной документацией.
- Порядок проведения внутренних аудитов.
- Порядок учета, ведения, хранения и обеспечения конфиденциальности материалов по сертификации персонала.
- Порядок привлечения экзаменаторов.
- Требования к экзаменаторам и их обязанности и др.

Данные документы постоянно актуализируются, и все изменения своевременно доводятся до сведения экзаменационных центров, так в связи с выходом новых версий ISO 17024, ISO 9712, ISO 19011 в документы были внесены изменения и все сотрудники экзаменационных центров и экзаменаторы были ознакомлены с ними.

Предъявляются единые требования к персоналу

Важным моментом является поддержание высокой квалификации экзаменаторов, работающих в экзаменационных центрах. Для этого проводятся различного рода совещания экзаменаторов, например, в г. Сочи осенью, где рассматриваются различные вопросы сертификации и экспертизы промышленной безопасности, важные не только для ОС НУЦ «Качество» и его экзаменационных центров, но и для всех российских органов по аттестации персонала. Участниками данных семинаров являются представители Российского общества неразрушающего контроля и технической диагностики, ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность», ЗАО «НПС «РИСКОМ» и другие представители промышленности.

По итогам проведения семинаров выносятся и принимаются различного рода решения. Так, например, была выпущена статья с изменениями (дополнениями) в РД 03-606-03 автором которой являются генеральный директор ОАО «ВНИКТИнефтехимоборудование» В.Н. Толкачев, заведующий лабораторией неразрушающих методов контроля и технической диагностики ОАО «ВНИКТИнефтехимоборудование», руководитель ЭЛБ Б.П. Пилин «Недопустимые ошибки в инструкции по визуальному и измерительному контролю», приняты к сведению дополнения к ПБ 03-440-02 в части сертификации персонала НК НДС СДОС 05-2010 «Положение об аттестации персонала в области неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния». Впервые были представлены документы СДСПНК РОНКТД и было объявлено о передаче функций Органа по аккредитации от ЗАО «МНПО «Спектр» к ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность», был представлен проект требований к учебным центрам по неразрушающему контролю, рассмотрены «Технические рекомендации к органам по сертификации персонала неразрушающего контроля» и многое другое.

В весенне-летний период ООО «НУЦ «Качество» проводит Международные семинары в различных странах, где рассматриваются новые документы, в том числе в 2013 г. был проведен семинар в г. Созополь Болгария совместно с болгарскими коллегами.

Нашими специалистами проводятся выездные совещания непосредственно в экзаменационных центрах, где все сотрудники и экзаменаторы знакомятся с новыми нормативными документами, процедурами, результатами семинаров, другой полезной информацией и могут задавать свои вопросы и предложения связанные с улучшением качества работы в центрах.

ООО «НУЦ «Качество» в своем составе имеет 9 экзаменационных центров по российским нормам и 7 экзаменационных центров и лабораторий по международным нормам.

Орган по сертификации несет ответственность за работу всех организованных при нем центров. С этой целью составляется план-график проведения аудитов, в центры направляются сроки проведения аудита.

Отделом СМК НУЦ «Качество» разработаны специальные чек-листы, которые включают в себя разделы: системы менеджмента качества, экзаменов, оборудования, компетентность экзаменаторов и т.д.

Использование аудиторами таких чек-листов позволяет беспристрастно и качественно оценивать работу экзаменационного центра.

Разработана процедура оценки экзаменатора, которая включает наблюдение за процедурой экзамена.

Все вышеперечисленное позволяет органу по сертификации и его экзаменационным центрам работать дружно, как единомышленники.

Подтверждением этого является успешное прохождение аккредитаций и ежегодных инспекционных аудитов DAkkS, ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность», Intertek, Российского морского и речного регистров и т.д.

СОЗДАНИЕ ОРГАНА ПО ПОДТВЕРЖДЕНИЮ СООТВЕТСТВИЯ ПЕРСОНАЛА

С.А. Страгнефорс,
президент КАНКТД, Республика Казахстан

ОЮЛ «Казахстанская ассоциация неразрушающего контроля и технической диагностики» в пилотном режиме проходит аккредитацию по СТ РК ИСО/IEC 17024-2012 по созданию органа по подтверждению соответствия (ОПС) персонала по схеме СТ РК ИСО 9712. Это первый в Казахстане ОПС персонала, который аккредитуется по требованиям международных стандартов в системе технического регулирования и приходит на смену учебным центрам, ранее работающим на основании аттестации Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан. Вводимая система обучения и аттестации позволит повысить квалификационный уровень специалистов неразрушающего контроля в процессе отбора согласно требованиям СТ РК ИСО 9712 и ликвидировать кадровый пробел в процессе аккредитации испытательных лабораторий в соответствии с требованиями СТ РК ИСО/IEC 17025.

Данный проект реализован при совместном участии членов КАНКТД по созданию учебного и экзаменационного центров, оборудованных при поддержке ТОО «Пергам Казахстан», ТОО «КПД-НДТ» (ОЕ) и ТОО «Казахстанский Центр Промышленной Безопасности».

В настоящий момент в Казахстане в г. Астане на базе ТОО «КПД-НДТ». Оба центра привлекают к работе специалистов III уровня, аттесто-

ванных в НУЦ «Качество» и «СертиНК» НУЦ «Сварка и контроль». Так что данный проект смело можно назвать интеграционным по внедрению передовых технологий в рамках Таможенного Союза по совместному продвижению в ВТО.

ГАРМОНИЗАЦИЯ ТРЕБОВАНИЙ К НЕЗАВИСИМЫМ ОРГАНАМ ПО АТТЕСТАЦИИ (СЕРТИФИКАЦИИ) ПЕРСОНАЛА С ISO/IEC 17024:2012

Филатова Н.Е.

ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность», Москва, Россия

В рамках Единой системы оценки соответствия в области промышленной экологической безопасности, безопасности в энергетике и строительстве органы по сертификации персонала проходят процедуру аккредитации в качестве независимых органов по аттестации (сертификации) персонала (НОАП) на соответствие требованиям СДА-13–2009 «Требования к независимым органам по аттестации (сертификации) персонала» и ISO/IEC 17024 «Оценка соответствия. Общие требования к органам, осуществляющим сертификацию персонала».

Независимые органы по аттестации (сертификации) персонала проводят аттестацию специалистов неразрушающего контроля, разрушающих и других видов испытаний и аналитического контроля и измерений. В настоящее время функционирует 38 НОАП из них: 36 НОАП по аттестации персонала в области неразрушающего контроля, 17 НОАП по аттестации персонала разрушающих и других видов испытаний и один НОАП по аттестации персонала в области аналитического контроля и измерений.

В 2009 г. СДА-13 был полностью переработан с учетом требований ISO/IEC 17024:2003 и регламентировал требования к политике и процедурам, организационной структуре, системе менеджмента качества, технической оснащенности, документации, персоналу и процедуре аттестации НОАП.

В связи с тем, что в 2012 г. вышло второе издание ISO/IEC 17024:2012, которое отменяет и заменяет собой первое издание ISO/IEC 17024:2003, возникла необходимость пересмотра Требований к независимым органам по аттестации (сертификации) персонала и гармонизации их с ISO/IEC 17024:2012.

Новая редакция СДА-13-2009 с изменениями, принятыми Наблюдательным советом решением от 28.08.2013 г. № 55-БНС, включает дополнительные требования к беспристрастности, конфиденциальности, безопасности, процессам рассмотрения жалоб и апелляций, системе менеджмента НОАП. Изменения были внесены и в структуру самого документа с учетом разделов ISO/IEC 17024:2012. При проведении аккредитации и инспекционного контроля НОАП осуществляется постепенный переход от старых требований к новым требованиям.

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ И РЕАЛИЗАЦИИ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОГРАММ

Фирстов В.Г.

*Московский государственный университет приборостроения
и информатики, Москва, Россия*

Рассмотрена роль и место метрологического обеспечения при реализации инновационных программ технологического развития и модернизации экономики. Показано, что для их выполнения необходимо проведение многочисленных высокоточных измерений, с использованием современных эталонов, применение международных стандартов, норм и правил. На основе мониторинга законодательной и нормативно-правовой базы показано, что действующее законодательство не позволяет в полной мере использовать потенциал метрологических институтов и ведущих вузов для решения этой задачи. Для повышения результативности инновационных программ предложена комплексная система метрологического обеспечения измерительных технологий, реализация которой должна обеспечить подтверждение возможности выполнения запланированных нормативных и метрологических мероприятий, получение достоверных и сопоставимых результатов измерений, контроля и диагностики и, соответственно, исключение принятия необоснованных решений и совершения ошибочных действий на основе недостоверной измерительной информации.

Рассмотрены механизмы нормативно-правового, научно-методического информационно-аналитического и организационно-экспертного обеспечения реализации информационно-аналитической системы, реализация которых основана на развитии образовательной программы повышения квалификации «Нормативное и метрологическое обеспечение целевых научно-технических программ и проектов, разрабатываемых по приоритетным направлениям развития экономики России», модернизации информационно-аналитической системы каталогизации наукоемких средств измерений, контрольно-испытательного и диагностического оборудования для научных исследований, разработанных специалистами МГУПИ, а также подготовки нормативно-правовых документов, устанавливающих порядок, содержание и организацию работ по разработке и реализации метрологических мероприятий и формированию метрологических индикаторов инновационных программ.

Разработка комплексной системы метрологического обеспечения формирования и реализации мероприятий инновационных программ позволит не только повысить их результативность и снизить экономические риски за счет исключения недостаточно обоснованных проектов, но и будет способствовать расширению их инвестиционной привлекательности.

СЕКЦИЯ 12. ACADEMIA NDT INTERNATIONAL

Руководитель секции: Дж. Нардони

ОБРАЩЕНИЕ МНОГОСЕНСОРНЫХ ДАННЫХ В ПРОБЛЕМЕ ОЦЕНКИ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ И ПРОГНОЗИРОВА- НИЯ РЕСУРСА ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА

Венгрилович В.Л., Клименко С.В.

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ

Горкунов Э.С.

Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЕЖЕННОГО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Mihovsky M.

ПОДГОТОВКА 11-й ЕВРОПЕЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ

Мазал П.

Чешское общество по НК

МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ НДТ

Нардони Д.

Международная академия NDT

ПОДГОТОВКА 19-й ВСЕМИРНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО НДТ И ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЕВРОПЕЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ НДТ

Пуршке М.

Немецкое общество по НК

NONLINEAR TIME REVERSAL USING SOLITONIC WAVES IN DISPERSIVE MEDIA: POTENTIAL APPLICATION FOR NONLINEAR NDT

Serge Dos Santos¹, Martin Lints², Jennifer Chaline¹ and Andrus Salupere²
¹*INSA Centre Val de Loire, U930 Inserm-Université de Tours,
3rue de la Chocolaterie, F-41034 Blois, France*
²*Institute of Cybernetics at Tallinn University of Technology*

Recent ten years have seen considerable development (both in numerical and experimental aspects) of optimized signal processing methods for improving nonlinear NDT methods derived from Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS). Using symmetry invariance, nonlinear Time Reversal (TR) and reciprocity properties, the classical NEWS methods are supplemented and improved by new excitations having the intrinsic property of enlarging frequency analysis bandwidth and time domain scales.

This is the case of TR-NEWS, recognized as a useful tool for microcracks detection of various complex samples [1], but also for nonlinear scatterers localization in the wide sense of Nonlinear Time reversal[2]. TR-NEWS experiments have been validated by the large number of simulation results supporting procedure reliability. TR-NEWS signal processing is performed using symmetrisation of coded-excitation practically realized using pulse-inversion methods. Response to positive and negative excitations allows the extraction of nonlinear signature of the sample under test. Among these family of “pulse coded excitation”, solitonic coding constitutes a new scheme in the sense that soliton are the best candidates for pulse propagation in nonlinear and dispersive media. Their robustness during propagation could inform aeronautic end-users during monitoring process of layered; granular, lightweight, functionally graded or phononic materials.

One of the main advantages of this approach is the possibility of taking into account intrinsic space scales, namely, the size of the grains or the distance between microcracks. It has been proved [3] that in such a medium dispersion and nonlinearity could be combined in the way that solitonic propagation could be observed experimentally [4, 5].

During this paper we will present the wide properties of soliton with an introduction of the basic behavior of solitons using examples from macroscopic physics. We will discuss applications from solid state and biological physics, to NDT and modern ultrasonic medical imaging.

Литература

1. Santos S. Dos and Prevorovsky Z. Imaging of Human Tooth Using Ultrasound Based Chirp-coded Nonlinear Time Reversal Acoustics. Ultrasonics. 2011. 51(6). 667 – 674.

2. **Frazier M., Taddese B., Antonsen T. and Anlage S.M.** Nonlinear Time Reversal in a Wave Chaotic System // Phys. Rev. Letters. 2013. 110. P. 063902.
3. **Ilison L., Salupere A. and Peterson P.** On the Propagation of Localized Perturbations in Media with Microstructure // Proc. Estonian Acad. Sci. Phys. Math. 2007. 56. P. 84 – 92.
4. **Lomonosov A.M., Kozhushko V.V. and Hess P.** Laser-based Nonlinear Surface Acoustic Waves: from Solitary to Bondbreaking Shock Waves. In Proc. 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics ISNA. American Institute of Physics, Stockholm. 2008. P. 481 – 490.
5. **Lints M., Salupere A. and Santos S. Dos.** Formation and Detection of Solitonic Waves in Dilatant Granular Materials: Potential Application for Nonlinear NDT, in Proc of the 7th International Workshop NDT in Progress, Fraunhofer Institute for Nondestructive Testing, Dresden branch IZFP-D, Germany. November 2013. P. 7–8.

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОМПЛЕКСНОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОСВАРНЫХ ТРУБ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ

Ткаченко А.А.

RI NDT “Introscop”, Кишинев, Молдова

В докладе приведена ретроспектива развития методов и средств комплексной диагностики, встроенных в технологическую линию производства электросварных труб, рассмотрены принципы построения современных систем контроля и результаты разработки и внедрения интеллектуальных комплексов для неразрушающего контроля (НК) ответственных зон трубы при их выпуске.

Производство прямошовных труб сваркой плавлением под слоем флюса осуществляется на современных трубоэлектросварочных агрегатах и состоит из трех частей: подготовки листа и его формовки, сварки шва трубы и отделки готовой трубы. Важнейшее место в обеспечении качества производства занимают средства комплексной диагностики, которые встроены в технологию и обеспечивают своевременное обнаружение дефектов в ответственных зонах трубы, таких как сварной шов и околошовная зона, концевые участки и торцы трубы, формирующие зону кольцевого сварного шва в процессе строительства трубопроводов.

Основными этапами технологии производства трубы являются: правка листа, контроль геометрии, входной ультразвуковой (УЗ) контроль листа, приварка технологических планок, разделка продольных кромок листа, подгибка кромок листа, U-образная формовка трубной заготовки, O-образная формовка трубной заготовки, гидросбив окалины и сушка трубной заготовки, сварка технологического шва, сварка внутреннего шва, сварка наружного шва, Далее следует технологический этап контрольных операций: визуальный контроль шва и поверхности трубы, технологиче-

ский автоматизированный ультразвуковой контроль (АУЗК) сварного шва, рентгено-телевизионный контроль (РТК) участков шва, отмеченных АУЗК, ручной ультразвуковой контроль (РУЗК) участков шва, отмеченных АУЗК. Трубы, в которых обнаружены дефекты, направляются на ремонт и возвращаются на повторный контроль, а у бездефектных труб производится обрезка технологических планок, калибровка концов трубы и снятие внутреннего усиления шва на концах труб. После гидроиспытаний выполняется сдаточный этап контрольных операций: АУЗК сварного шва, АУЗК концевых участков трубы, РТК концов сварного шва, магнитно-люминесцентный контроль (МЛК) торцов трубы после снятия фасок на торцах трубы, контроль геометрии. Трубы с дефектами концевых участков направляются на их обрезку, после чего они возвращаются на позицию контроля концов, если отрезка конца невозможна из-за выхода длины за минимальное значение, труба бракуется. На каждую трубу без дефектов формируется электронный паспорт и осуществляется окончательная приемка. На отдельном участке производится нанесение внутреннего и наружного изоляционных покрытий труб и их складирование.

Решение важнейших задач автоматизированных методов контроля направлено на обеспечение достоверности процесса при заданной производительности и обусловлено требованиями, предъявляемыми к контролю. Преимущественно в современных системах диагностики используются вариации эхо-метода, тандем-метод, дельта- и теневой методы УЗ контроля. На достоверность контроля существенное влияние оказывают следующие факторы: качество поверхности трубы, стабильность акустических характеристик металла стенки трубы и геометрии валика усиления сварного шва труб, стабильность настроек электрических и акустических параметров аппаратуры, стабильность поддержания установленного расстояния между пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭП) и сварным швом в процессе взаимного перемещения, стабильность температуры всех элементов системы, составляющих акустический тракт (призма ПЭП, контактная жидкость, металл стенки трубы и сварного шва). Для поддержания высокой достоверности важным является обеспечение приемлемого соотношения сигнал-шум в зоне строб-импульса в динамике контроля. Мешающими при этом являются сигналы от кромок валика усиления, являющиеся синхронными помехами, внешние электромагнитные наводки и акустические шумы, которые являются случайными несинхронными помехами, также существенно снижающими достоверность контроля. Качественным показателем контроля является высокая вероятность определения ориентации, размеров и вида выявленного дефекта (плоскостной, объемный или объемно-плоскостной).

Стремительное развитие микроэлектроники и вычислительной техники в последнее десятилетие положительным образом отразилось на совершенствовании принципов построения установок автоматизированного УЗ

контроля сварных труб в условиях производства. На смену громоздким малоканальным аналоговым системам поэтапно внедрялись новые цифровые системы и технологии, программируемые логические матрицы, системы обработки и отображения информации, а также управление работой установок по алгоритму: программная загрузка параметров установки, проведение контроля, выполнение обработки результатов контроля в реальном масштабе времени, формирование и выдача паспорта контроля в АСУ ТП цеха и завода.

Одновременно со схемным и структурным совершенствованием установок развивались принципы адаптации установок к условиям контроля и требованиям норм и стандартов, создания и внедрения новых методик контроля. Управляющий дефектоскопический комплекс на базе индустриального компьютера позволяет создавать базы данных, как для настройки установки, так и запоминания и долговременного хранения результатов контроля, использовать различные сервисные устройства и выносной монитор для настройки акустических систем. Благодаря этому реализована возможность на программном уровне изменять от такта к такту параметры контроля: установки стробов, мощности генератора, подключения ПЭП различных типов, изменение схем их подключения, изменение браковочных критериев в процессе контроля в зависимости от положения акустического блока.

На основе проведенных исследований, для обеспечения высокой достоверности результатов и производительности контроля, сформулированы **основные принципы** построения новых установок УЗ контроля на базе управляющих комплексов:

- реализация на современном уровне известных и новых достижений дефектоскопической науки и результатов исследований акустического тракта применительно к контролю сварных швов и краевых полос труб в условиях поточного производства (оптимизация параметров ПЭП, выбор схем прозвучивания с учетом технологии сварки и характера возникающих дефектов);
- исследование и развитие сервисных способов автоматизированного УЗ контроля, а именно: способов повышения достоверности контроля, слежения за сварным швом, защиты от синхронных и несинхронных помех, определения вида и опасности выявленных дефектов;
- совершенствование функциональных узлов аппаратной части комплексов – генераторов импульсов возбуждения, усилителей, устройств АРУ, реализация в аппаратуре новых способов защиты от синхронных и несинхронных помех, слежения за сварным швом, определения вида выявленных дефектов, используя современные достижения в области информационных технологий (управляющие комплексы, программные продукты, алгоритмы обработки информации, функции самодиагностики аппаратуры и др.).

В условиях производства прямошовных труб большого диаметра в ОАО «ВМЗ» на отдельных участках УЗ контроля разработаны и внедрены следующие системы и оборудование.

Технологический АУЗК сварных швов осуществляется установками НК 360, 361 (RI NDT “Introscope” and E.O. Paton EWI), созданными на основе ультразвукового многоканального комплекса Интроскоп-02.01, и предназначенными для выявления округлых и плоскостных дефектов продольной и поперечной ориентации по всему объему сварного шва и обеспечивающими обработку, отображение результатов контроля и формирование протокола контроля на каждую трубу. Установки АУЗК оборудованы автоматической звуковой, световой сигнализацией и краскопультами для отметки дефектных участков сварного шва и зон ухудшения качества акустического контакта. На входе участка УЗ контроля установлено лазерное устройство, обеспечивающее слежение акустической системой за сварным швом с точностью ± 1 мм. Для обнаружения продольных и объемных дефектов используются две пары наклонных пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) со щелевым контактом и, в зависимости от толщины стенки трубы, до трех пар сдвоенных локально-иммерсионных преобразователей, работающих по методу «тандем» и позволяющих выявлять и разделять дефекты по толщине сварного шва. Для обнаружения поперечных дефектов в шве применяются одна или две пары локально-иммерсионных преобразователей, расположенных над сварным швом и обеспечивающих ввод ультразвука непосредственно в шов под углом 45 градусов. Фиксация результатов контроля труб производится в памяти вычислительного комплекса установки, с последующей записью на архивные носители.

АУЗК концов труб выполняется установками НК 362 (RI NDT “Introscope” and E.O. Paton EWI), созданными на основе ультразвукового многоканального комплекса Интроскоп-02.02 и предназначенными для выявления продольных трещин и дефектов типа «расслоение» в металле стенки трубы по периметру концевых участков труб и обеспечивающими обработку, отображение результатов контроля и формирование протокола контроля на каждую трубу. Установки НК-362 оборудованы автоматической звуковой, световой сигнализацией и краскопультами для отметки дефектных зон и участков ухудшения качества акустического контакта. Для контроля используется четыре акустических блока, по два на каждом конце трубы, осуществляющие сканирование обеих концов трубы одновременно с объемом контроля до 60 мм за два оборота. Каждый акустический блок состоит из четырёх ПЭП, один из которых раздельно-совмещённый – для обнаружения дефектов типа расслоений в краевой полосе стенки и три наклонных ПЭП – для обнаружения продольных дефектов.

РУЗК сварных швов и концов труб по периметру предназначен для контроля концевых участков сварного шва на длину не менее 250 мм (на обоих концах трубы), не проконтролированных АУЗК, и участков сварного

шва с отметками АУЗК, а так же контроль концевых участков труб по периметру с отметками АУЗК концов труб. РУЗК сварных швов осуществляется установками на базе ультразвуковых дефектоскопов УД2-12 (RI NDT “Introscope”), УДЦ-201П и СКАРУЧ.

Комплекс методов НК, регламентированных на каждом этапе производства электросварных труб с целью повышения его эффективности, базируется на более чем 30-ти стандартах и нормативных документах, в зависимости от назначения и условий применения готовых труб.

Повышение эффективности производства дает возможность одному из ведущих металлургических предприятий отрасли – ОАО «ВМЗ» занимать передовые позиции в поставках труб на строительство магистральных трубопроводов, включая подводные, такие как: газопровод Nord Stream, включая подводную часть, Сахалин-1, Сахалин-2, Узбекистан-Китай и др.

О ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ICNDT

Фарлей М.
ICNDT

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

А		Белов Д.А.	224
Абрамова Е.В.	206, 217	Белов Ю.И.	259
Азизова Е.А.	469	Бенитес Х.	105
Аленков В.В.	369	Берлизов Е.В.	183
Алехин С.Г.	91, 120	Бессонов В.Б.	162, 166
Алтухов Ю.А.	313	Бишко А.В.	115
Арбузов Е.В.	74	Блохин Е.О.	172
Артемьев Б.В.	157, 469	Бобренко В.М.	115
Артемьев И.Б.	157, 469	Бобров В.Т.	115
Архипов М.В.	166	Бобров С.В.	91
Аугутис В.	376	Богод В.Б.	183
Ахметханов Р.С.	439	Богомолов Е.Н.	170, 290
		Бойченко С.Н.	247, 338, 352
Б		Борисков Ю.	63
Бабилов С.А.	158	Будадин О.Н.	211, 215, 217, 236
Бадалян В.Г.	92, 95	Бузанов О.А.	369
Баев А.Р.	96, 100	Буклей А.А.	172, 446
Бажанов А.С.	443	Булаев И.Ю.	224
Базулин А.Е.	103, 105	Бурков М.В.	313, 392
Базулин Е.Г.	109, 111	Бутусов О.Б.	417, 418
Бакулин В.Н.	267	Быков С.П.	121, 388
Бакунов А.С.	31, 63	Быстрова Н.А.	206, 470, 472
Балобанов Е.Н.	126	Бяков А.В.	382, 392
Баранов А.В.	446	В	
Баранова Н.И.	268	Вавилов В.П.	29
Барат В.А.	397, 399	Вальке А.А.	230
Бардаков А.В.	209, 210	Васильев В.А.	154
Басакин В.В.	353	Васильев И.Е.	397, 433
Батов Г.П.	311	Ваштакас Э.	376
Батрагин А.В.	158, 160	Велиахметов С.А.	211
Бахматов П.В.	378	Великанов Л.П.	166
Башков О.В.	382, 385, 392, 401	Венгринович В.Л.	180, 316, 499
Башкова Т.И.	385	Виноградов А.Ю.	425
Безлюдько Г.Я.	32	Виноградова Н.И.	42
Бекаревич А.А.	211	Владимиров Л.В.	173
Белкин В.К.	206		

Власов В.В.	174	Долгих А.В.	179
Волков Е.С.	351	Дорофеев И.О.	227
Волков П.В.	259	Дубинин Е.Ф.	439
Волкова Е.Э.	417, 418	Дубов А.А.	36, 319
Волкова Л.В.	126	Дубов Ал.Ан.	35
Волкова Н.Н.	474, 477	Дунаевский Г.Е.	227
Воронков И.В.	117	Дутышев И.Н.	443

Г

Гаденин М.М.	333
Галкин Д.И.	206, 470, 472
Гарифуллин М.Ш.	233
Герасимов В.А.	166
Гетманов В.Г.	347
Глазков Ю.А.	58, 272
Глоба С.Н.	140
Гнедин М.М.	198
Гнусин А.Б.	281
Гоголинский К.В.	273
Гомера В.П.	394
Горбачев В.И.	492
Горбачев С.В.	290
Горбунов О.Е.	145
Горелов М.В.	220
Горкунов Э.С.	28, 33, 499
Горшков В.А.	178
Горюнов А.В.	259
Гребеньков П.М.	299
Грязнов А.Ю.	192
Гуделев В.Г.	96, 100
Гульшин А.В.	115
Гуцев Д.Ф.	67, 71

Д

Данилин Н.С.	224
Деленковский Н.В.	281
Демин А.В.	224
Дергачев А.Н.	480, 481
Десятниченко А.В.	140
Димитров Д.М.	224

Е

Елизаров С.В.	397, 399
Емельянов М.Е.	172, 446
Еремин А.В.	313
Ермолаев А.А.	311
Ефимов А.Г.	63

Ж

Жамова К.К.	189
Жданов А.Г.	67, 71
Желудков А.В.	166
Жильников Е.П.	351
Жуков Р.Ю.	67, 71
Жуков С.Н.	118

З

Забелин А.Н.	369
Загидулин Р.В.	321
Загидулин Т.Р.	64, 321
Загубисало П.С.	249
Задворкин С.М.	33, 37, 41, 55
Заец М.В.	120
Зайцев А.В.	355
Заренбин А.В.	247, 338
Застава А.П.	154
Захаренко В.А.	230
Зверев А.В.	145
Злобин Д.В.	129
Золотарев С.А.	180
Зубков И.Л.	275
Зусман Г.В.	351

И			
Иванов В.И.	325, 397, 433, 480	Костиков Е.С.	278
Иванов И.И.	374	Костюков Ал.В.	353, 355
Ивченков А.О.	447	Костюков В.Н.	352, 357
Илларионов И.А.	259	Котоломов А.Ю.	126
Иншаков Д.В.	121	Кудрявцев Д.А.	31
		Кузеванов В.Ф.	33
И			
Кадилин В.В.	205	Кузелев Н.Р.	183
Казанцева Н.В.	42	Кузнецов К.А.	121, 329
Казарин Д.В.	355	Кузнецов С.А.	249
Каксис Ю.А.	474	Кузьмин Е.В.	145
Каледин В.О.	236	Кулак Г.В.	100
Капранов Б.И.	160	Кульков А.А.	215, 236
Карасев В.А.	351, 362, 374	Кумпаненко И.В.	467
Карпов В.М.	326	Л	
Кекин А.Г.	447, 454	Лаврентьев А.А.	67
Клименко С.В.	316, 499	Лаврентьев Ю.Л.	351, 362
Клименов В.А.	201	Ларин А.А.	267
Клоков А.В.	263	Латипова Л.М.	137
Клюев В.В.	27	Ле чи Хиеу	140
Ковалев А.В.	447, 449, 454	Лебедев М.Б.	462
Ковалев М.М.	183	Лифшиц В.А.	184
Коваленко А.Н.	37	Лобаев А.Н.	278
Козлов А.А.	173	Ловчев В.Н.	67, 71
Козлов А.В.	124	Лозовский В.Н.	332
Козлов В.К.	233	Лончаков С.З.	378, 401
Козлов В.Н.	124	Лунин В.П.	67, 71
Колесников Н.П.	224	Лушников А.В.	238
Кондратьев М.И.	351	Любутин П.С.	313
Коннов А.В.	64	М	
Коновалов А.Б.	174	Мазал П.	499
Коновалов Г.Е.	96	Мазуров А.И.	192
Коновалов Н.Н.	480, 481, 483, 484	Майоров А.Л.	96
Копытов С.Г.	311, 486	Манушкин А.А.	462
Кореев А.А.	370	Марчук В.Н.	443
Корнилова А.В.	325		

Матвеев В.И.	239, 443, 463		
Матвеева А.Г.	100	Овчарук В.Н.	410, 414
Матвиенко Ю.Г.	397, 433	Огнева М.С.	38
Махов В.Е.	240	Ольшанский Ю.И.	463
Махутов Н.А.	333, 336	Онопко Н.В.	206
Мелешко Н.В.	484	Опанасенко А.В.	73
Мерсон Д.Л.	425	Осес Е.Р.	184
Местэртон А.П.	443	Осипов С.П.	201
Мигун Н.П.	281		
Милецкий Б.И.	405		
Митьковец А.И.	100	П	
Моисеев Ю.Н.	299	Павленков Д.В.	352
Мостяев И.В.	83	Панин С.В.	313, 382, 392
Муллин А.В.	474, 477	Панков А.В.	433
Муравьев В.В.	126, 406, 488	Параев С.А.	417, 418
Муравьев В.И.	378, 401, 435, 436	Паршин И.А.	172, 446
Муравьева О.В.	129	Паулиш А.Г.	249
Мурашов В.В.	243, 339	Пенкин К.В.	296
Мусатов В.В.	325, 337	Передерий А.Н.	463
Муханова Т.А.	187	Петерсен Т.Б.	418
Мушников А.Н.	37	Петренко Е.О.	74
Мынцов А.А.	370	Петрищев О.Н.	140
Мякушев К.В.	89	Петров А.А.	133
Мясников В.М.	278, 284, 303	Петров К.В.	252
		Петров Н.И.	351, 362, 374
		Петухов Ю.В.	388
	Н	Пицык В.С.	378, 436
Назаренко Г.М.	351, 362, 374	Плетнев Н.О.	378
Нардони Д.	499	Поволоцкая А.М.	55
Науменко А.П.	247, 338, 358	Подвальный А.М.	372
Наумов В.Н.	286, 306	Подольский А.В.	120
Ненахов Ю.Ю.	447	Подымский А.А.	189
Нефедьев Е.Ю.	394	Познякова М.Е.	140
Николаев С.М.	351, 362	Покровский А.Д.	80
Николаева Н.С.	287, 290	Полковников А.В.	492
Нитиевский А.А.	248	Полтаранин М.А.	392
Ничипурук А.П.	38	Пономарева И.Н.	493
Новиков В.А.	64	Попкова А.А.	382, 385

Т		Чернов Д.В.	397
Тарабрин В.Ф.	145	Чертов Д.Н.	77
Тараненко Е.В.	303	Чугунов А.В.	425
Тарасов Е.В.	247, 338	Чумаков А.Г.	211
Темник А.К.	201	Чуприн В.А.	148, 151, 154
Тихомиров К.А.	286, 306	Ш	
У		Шарапановский Д.В.	405
Тихонов Д.С.	103, 105	Шашкин В.И.	259
Тишкин А.П.	428	Шевалдыкин В.Г.	115
Ткаченко А.А.	343, 405, 501	Шелихов Г.С.	58, 59, 60
Тонкоглаз В.А.	201	Шемякин В.В.	418
Троицкий-Марков Т.Е.	257	Шиманский А.Г.	399
Ф		Шипилов С.Э.	263
Углов А.С.	174	Шкатов П.Н.	83, 84, 86, 89
Усачев В.Е.	198, 462	Шнель О.О.	105
Усачев Е.Ю.	198, 462, 463	Шорр Б.Ф.	374
Ф		Шпаков И.И.	53
Фарлей М.	505	Штейн М.М.	462
Федоринин В.Н.	249	Шубочкин А.Е.	63
Федоровский Е.В.	172	Щегинкин С.А.	462
Физулаков Р.А.	435	Э	
Фиклистов А.Г.	388	Эпинатьев И.Д.	467
Филатова Н.Е.	497	Ю	
Филимонов С.А.	447	Юмашев В.М.	205
Филинов М.В.	57, 308, 345	Я	
Фирсов А.А.	347, 399	Якубов В.П.	263
Фирстов В.Г.	498	Якушенко Е.И.	37
Фролов А.В.	401, 436	Andrus Salupere	500
Фурсов А.С.	345	Hu Xiaowei	201
Х		Jennifer Chaline	500
Хвостов А.А.	80	Li Suqi	201
Хомяк Ю.В.	140	Martin Lints	500
Ц		Mihovsky M.	499
Цурпаль А.Е.	353	Serge Dos Santos	500
Цыбульский Е.А.	463	Sun Xiaoming	201
Ч			
Чахлов С.В.	160, 201, 462		
Чегодаев В.В.	67, 71		
Черниговсий В.Ю.	418		

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**XX ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ
И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ**

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Москва, 3 – 6 марта 2014 г.

Редакционный совет: **Артемьев Б.В., Елисеев Д.А., Клейзер П.Е.**

Инженеры по компьютерному макетированию
А.И. Евсейчев, Г.Ю. Корабельникова
Художественное оформление *Н.И. Смольянина*

Сдано в набор 24.01.2014 г. Подписано в печать 16.02.2014 г. Формат 60×90 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная.
Уч.-изд. л. 32. Тираж 300 экз. Заказ

ООО «Издательский дом «СПЕКТР», 119048, Москва, ул. Усачева, д. 35, стр. 1.
Тел.: (495) 514 76 50. [Http://www.idspektr.ru](http://www.idspektr.ru). E-mail: info@idspektr.ru

Отпечатано в типографии ООО «Белый Ветер»
115054, Москва, ул. Щипок, 28
E-mail: wwprint@mail.ru. [Http://www.wwprint.ru](http://www.wwprint.ru)