

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

ИННОВАЦИИ В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ SibTest

Сборник научных трудов
I Всероссийской научно-практической конференции
по Инновациям в неразрушающем контроле
с международным участием

25–29 июля 2011 г.

Издательство
Томского политехнического университета
2011

УДК 620.179
ББК 30.82
И66

И66 **Инновации в неразрушающем контроле SibTest:** сборник научных трудов I Всероссийской с международным участием научно-практической конференции по инновациям в неразрушающем контроле / под ред. В.А. Клименова, Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 309 с.

Сборник содержит доклады I Всероссийской научно-практической конференции по Инновации в неразрушающем контроле с международным участием, проходившей в парке-отеле «Ая», Горном Алтае, 25–29 июля 2011 года.

УДК 620.179
ББК 30.82

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ:

Институт неразрушающего контроля Национального исследовательского Томского политехнического при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований.
Российское общество неразрушающего контроля и технической диагностики.
Министерство образования и науки Российской Федерации.
Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики.

СЕКЦИИ КОНФЕРЕНЦИИ:

Секция 1. «Ультразвуковой и акустический контроль»
Секция 2. «Тепловой контроль»
Секция 3. «Радиационный контроль»
Секция 4. «Инновационные методы в неразрушающем контроле»
Секция 5. «Другие методы неразрушающего контроля»

*Сборник издан при финансовой поддержке РФФИ
Грант № 11-08-06-05-62*

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2011
© Обложка. Издательство Томского
политехнического университета, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНЫХ НА МИРОВОМ РЫНКЕ СИСТЕМ ЦИФРОВОЙ РАДИОГРАФИИ (СЦР) <i>Клименов В.А., Касьянов В.А., Лебедев М.Б., Москалев Ю.А., Темник А.К., Штейн М.М., Чахлов С.В.</i>	10
ТЕПЛОЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ: ИСТОРИЯ, СОСТОЯНИЕ, ТЕНДЕНЦИИ <i>Вавилов В.П.</i>	14
МНОГОМАСШТАБНЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ И УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ДАННЫМ ТЕНЗОМЕТРИИ, КАРТИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИИ НА ПОВЕРХНОСТИ И АКУСТО-ЭМИССИИ <i>Панин В.Е., Панин С.В., Бяков А.В., Бурков М.В., Любутин П.С.</i>	19
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ В КАБЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ <i>Гольдштейн А.Е., Редько В.В., Федоров Е.М.</i>	24
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ И ТЕРАПЕВТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ <i>Сырымкин В.И., Буреев А.Ш., Осипов А.В., Жданов Д.С.</i>	30
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПЫТНЫХ СИСТЕМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ОКСИДА ГАДОЛИНИЯ В СНАРЯЖЕННОМ ТВЭГЕ <i>Карлов Ю.К.</i>	33
ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПЛАНТАТОВ ИЗ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ТИТАНА МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ <i>Шаркеев Ю.П., Клименов В.А., Белявская О.А., Капранов Б.И., Белкин Д.С., Ерошенко А.Ю.</i>	38
РЕНТГЕНОВСКИЙ СКАНЕР ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ДОСМОТРА АВТОТРАНСПОРТА <i>Манушкин А.А., Андрианов М.В., Лебедев М.Б., Чахлов С.В.</i>	43
АППАРАТУРА ДЛЯ ДОСМОТРА РУЧНОЙ КЛАДИ И БАГАЖА. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ <i>Щетинкин С.А., Аметов В.И., Чумаков Д.М., Усачев Е.Ю.</i>	46
РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КОЛЬЦЕВЫХ СВАРНЫХ ШВОВ В СИСТЕМЕ ТРУБА-ТРУБНАЯ ДОСКА <i>Усачев Е.Ю., Твердохлебов В.Н., Коковкин А.В., Чахлов С.В.</i>	48
3D ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ НАУЧНЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРИМЕНЕНИЙ <i>Чугуй Ю.В., Верховляд А.Г., Ступак М.Ф., Поташиников А.К., Обидин Ю.В.</i>	52

РАДИОТОМОГРАФИЯ ФОРМЫ НЕПРОЗРАЧНЫХ ОБЪЕКТОВ <i>Якубов В.П., Шитилов С.Э., Суханов Д.Я.</i>	57
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ СИСТЕМ ЦИФРОВОЙ РАДИОГРАФИИ <i>Толбанов О.П.</i>	61
ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ В КВЧ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН <i>Юрченко В.И.</i>	66
КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЛЁТНЫХ ПАРТИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НАВИГАЦИИ И СВЯЗИ <i>Максимов Ю.В., Кочура С.Г., Максимов И.А., Иванов В.В., Арчаков В.Г., Вавилов В.В., Клименов В.А., Зыков В.М.</i>	74
ЭВОЛЮЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ПРОЦЕССЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ КРУПНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО И УЛЬТАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО ТИТАНА <i>Шаркеев Ю.П., Вавилов В.П., Скрипняк В.А., Клименов В.А., Белявская О.А., Нестерук Д.А., Козулин А.А., Толмачев А.И.</i>	79
СИСТЕМА ЕВРОПЕЙСКИХ СТАНДАРТОВ ПО РАДИОГРАФИЧЕСКОМУ КОНТРОЛЮ <i>Гнедин М.М., Галкин Д.И.</i>	83
О ТЕОРЕТИКО-ГРУППОВОЙ ТРАКТОВКЕ ПОНЯТИЯ «ДЕФЕКТ» <i>Баранов В.А., Эверт У.</i>	85
МАГНИТНЫЙ ВЗАИМОИНДУКТИВНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ БИЕНИЙ ИЗМЕРИТЕЛЯ НЕСООСНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ <i>Алимов Д.В., Вахрушев Д.В., Гольдштейн А.Е.,</i>	88
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЦИФРОВОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ ДЛЯ ТОЛЩИНОМЕТРИИ ТРУБОПРОВОДОВ <i>Алхимов Ю.В., Завьялкин Ф.М., Санников А.Е.А.</i>	92
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СВЕРХМИНИАТЮРНЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ВИРТУАЛИЗИРОВАННЫХ ПРИБОРАХ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ <i>Дмитриев С.Ф., Иииков А.В., Лященко Д.Н.</i>	94
МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО СПЛАВА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОМ ОБЛУЧЕНИИ В АЗОТСОДЕРЖАЩЕЙ ПЛАЗМЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА <i>Овчаренко В.Е., Иванов Ю.Ф., Моховиков А.А.</i>	99

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ЦИФРОВОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ <i>Алхимов Ю.В., Гнюсов С.Ф., Капранов Б.И., Клименов В.А.</i>	104
АКУСТОЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ (АЭМ) МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЬ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ <i>Кузнецов В.П., Кулешов В.К.</i>	106
КВАЗИТОМОГРАФИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕКОНСТРУКЦИИ ЗОНЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕЩИН ПО РАДИОГРАФИЧЕСКИМ ПРОЕКЦИЯМ <i>Баранов В.А., Эверт У., Редмер Б., Кренинг М.</i>	109
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ СВАРКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ <i>Степанова Л.Н., Канифадин К.В.</i>	113
ACOUSTIC EMISSION DIAGNOSTICS OF DESTRUCTION STAINLESS STEEL PIPES ARISING WELDING <i>Aparasov A.M.</i>	117
ПЕРСПЕКТИВЫ И НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ НА НАНОЭЛЕКТРОДАХ <i>Авдеева Д.К., Лежнина И.А., Малый М.В., Пеньков П.Г., Садовников Ю.Г., Уваров А.А., Фролов М.Д.</i>	121
ЛАЗЕРНЫЙ МОНИТОР В ЗАДАЧАХ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ <i>Евтушенко Г.С., Губарев Ф.А., Тригуб М.В., Торгаев С.Н.</i>	125
ОСОБЕННОСТИ НОРМИРОВАНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ <i>Кулешов В.К., Лимарева А.В., Чухланцева М.М.</i>	128
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНТЕГРИРОВАННЫЕ СТРУКТУРНО-ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ В ТЕХНИЧЕСКОЙ И МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ, МОНИТОРИНГЕ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ ГОРОДОВ <i>Сыряжкин В. И., Буреев А. Ш., Глушков Г. С., Горбачев С.В., Жданов Д. С</i>	132
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОНИТОРИНГ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ТАШТАГОЛЬСКОМ ЖЕЛЕЗОРУДНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ <i>Беспалько А.А., Яворович Л.В., Федотов П.И., Штирц В.А.</i>	135
МЕТОД И АППАРАТУРА АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО МОНИТОРИНГА УЗЛОВ ПУСКА-ПРИЁМА ОЧИСТНЫХ И ДИАГНОСТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ <i>Оглезнева Л.А.</i>	140
ЕЩЁ РАЗ К ВОПРОСУ ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОВОЙ ТОМОГРАФИИ <i>Троицкий О.Ю., Harald Reiss, Медведев В.В.</i>	143

РАДИОТОМОГРАФИЯ ПО ВЫБОРОЧНЫМ ДАННЫМ <i>Якубов В.П., Шитилов С.Э., Клоков А.В., Федянин И.С.</i>	144
РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ШОРА В ВИРТУАЛИЗИРОВАННОМ ТВЕРДОМЕРЕ <i>Донцов А., Прокопов Д., Сальников К., Петрицкий Р.</i>	148
МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ КВЧ АНТЕНН ДЛЯ СИСТЕМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ <i>Трубачев А.А., Юрченко В.И.</i>	150
МЕТОД СВЧ ДЕФЕКТОСКОПИИ МЕТАЛЛОВ <i>Суторихин В.А.</i>	152
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ДЕФЕКТОСКОПИИ ПРУТКОВ И ТРУБ КОМБИНИРОВАННОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С РАЗНОЧАСТОТНЫМИ ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ КОМПОНЕНТАМИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ <i>Гольдштейн А.Е., Булгаков В.Ф., Крёнинг Х.-М.В.А.</i>	154
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ТРЕХМЕРНОЙ БЕСКОНТАКТНОЙ ПРОФИЛОМЕТРИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКОЙ <i>Ковалевская Ж.Г., Уваркин П.В., Толмачев А.И.</i>	158
МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ (НА ПРИМЕРЕ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ) <i>Свинолулов Ю.Г., Корнев В. А., Кулешов В.К.</i>	163
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНТЕГРИРОВАННЫЕ СТРУКТУРНО- ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ГОРОДОВ <i>Сырямкин В.И., Глушков Г.С., Лунев С.О., Бурмантов С.И.</i>	170
ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ЗОНЫ НАПРАВЛЕННОГО РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ <i>Баннов К. В., Матвеев В.С., Градобоев А.В.</i>	172
МЕТОД ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ КАТАСТРОФ <i>Апасов А. М.</i>	176
РЕЗОНАТОРНЫЙ СВЧ ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КРЕМНИЯ «СОЛНЕЧНОГО КАЧЕСТВА» <i>Юрченко А.В., Новиков А.Н., Китаева М.В.</i>	183
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ТОМОГРАФИЯ СКРЫТЫХ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ <i>Якубов В.П., Шитилов С.Э., Сатаров Р.Н.</i>	188
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ И ДЕФЕКТОСКОПИИ <i>Буллер А.И., Бабилов С.А., Москалев Ю.А., Кулешов В.К.</i>	193

МОНИТОРИНГ И ДИАГНОСТИКА ДЕСТРУКТИВНЫХ ЗОН В ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД ПО ПАРАМЕТРАМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИГНАЛОВ И ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭМИССИИ <i>Беспалько А.А., Яворович Л.В., Федотов П.И., Бомбизов А.А.</i>	198
ТЕПЛОВИЗИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ СВАРИВАЕМОГО ИЗДЕЛИЯ ПРИ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ <i>Ильященко Д.П., Чинахов Д.А.</i>	203
СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОЛЩИНОМЕТРИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК <i>Ефимов В. Г., Ложкова Ю.Н.</i>	207
РАЗРАБОТКА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТНОСТИ И ПРОЧНОСТИ БЕТОНА ПО ПАРАМЕТРАМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОТКЛИКА НА УПРУГОЕ УДАРНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ <i>Фурса Т.В., Осипов К.Ю., Данн Д.Д.</i>	211
ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ АЭРОКОСМИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ <i>Сырямкин В.И., Горбачев С.В., Гафуров А.О., Глушков Г.С., Бородин В.А.</i>	215
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОБРАБОТКИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ <i>Степанова Л.Н., Рамазанов И.С.</i>	219
МЕТОДЫ НЕЛИНЕЙНОГО ОБРАТНОГО ПРОЕЦИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МАЛОРАКУРСНОЙ ТОМОГРАФИИ В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ <i>Баранов В.А., Эверт У., Кренинг Х.-М., Бразовский В.В., Учайкина Е.С., Кулешов В.К.</i>	222
ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ГЕНЕРАТОРНЫХ МОДУЛЕЙ НА ДИОДАХ ГАННА ДЛЯ СИСТЕМ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНОГО КОНТРОЛЯ <i>Пушкарев В.П., Пелявин Д.Ю., Юрченко В.И, Жарских В.Д.</i>	226
NON DESTRUCTIVE TESTING FOR NUCLEAR POWER PLANT LIFE EXTENTION <i>Sednev D.A.</i>	230
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ <i>Сыч Т.В., Герасимов С.И., Кулешов В.К.</i>	233
КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАДИАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЯХ <i>Чигорко А.А.</i>	236

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОВОЛНОВЫМИ МЕТОДАМИ СТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ <i>Юрченко А.В., Юрченко В.И., Новиков А.Н., Китаева М.В.</i>	239
КОНТРОЛЬ СООСНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ <i>Якимов Е.В., Гольдштейн А.Е., Алимов Д.В., Вахрушев Д.В.</i>	243
РЕАЛИЗАЦИЯ МОДИФИКАЦИИ SAFT-АЛГОРИТМА ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ <i>Носков Н.Н., Шестаков В.В.</i>	248
КОМПЛЕКС ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННО МОДУЛИРОВАННЫХ ПОЛЕЙ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ В ВИДИМОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАЗМЕННОЙ ИНДИКАТОРНОЙ ПАНЕЛИ <i>Жарков А.В., Кулешов В.К., Учайкина Е.С.</i>	253
ИНТЕГРИРОВАННЫЕ АКУСТО-ОПТИКО-ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТВЕРДЫХ, ЖИДКИХ И ГАЗООБРАЗНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ <i>Сырямкин В.И., Саньков Д.В., Глушков Г.С., Бородин В.А., Занкина И.С.</i>	255
ТЕПЛОЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ В ПРОИЗВОДСТВЕ ДИОДОВ ГАННА <i>Юрченко В.И., Юрченко Н.М.</i>	257
ТЕХНОЛОГИЯ PLC И ЕЕ ПЕРСПЕКТИВЫ В РАЗВИТИИ АСКУЭ <i>Николенко К.В., Юрченко А.В.</i>	261
СИММЕТРИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИНЦИПА ПРИЧИННОСТИ В СТРУКТУРНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ МЕТОДАХ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ <i>Баранов В.А., Эверт У.</i>	266
АЛГОРИТМ ПОЛУЧЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ШКАЛЫ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПОВЕРКЕ СТРЕЛОЧНЫХ ПРИБОРОВ <i>Свинолунов Ю.Г., Кулешов В.К., Корнев В.А., Учайкина Е.С.</i>	270
ДИАГНОСТИКА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ <i>Юрченко А.В., Китаева М.В., Козлов А.В., Охорзина А.В.</i>	273
СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЕ ДИСТАНЦИОННОЕ РАДИОВИДЕНИЕ <i>Якубов В.П., Шитлов С.Э., Суханов Д.Я., Разинкевич А.К.</i>	278
МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ СУБЪЕКТОВ В КОНКРЕТНЫХ УСЛОВИЯХ <i>Учайкина Е.С., Кулешов В.К.</i>	282
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СВЕТОТЕХНИЧЕСКИХ СВЕТОДИОДНЫХ ИЗДЕЛИЯХ <i>Акимов Б.В., Гилева В.Н., Дениско С.В., Лукаш В.С., Сорокин В.Т., Юрченко В.И.</i>	285

ОЦЕНКА ТРАВМОБЕЗОПАСНОСТИ НА РАБОЧИХ МЕСТАХ <i>Чулков Н.А., Бородин Ю.В.</i>	288
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМО-ЭДС ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ <i>Солдатов А.А.</i>	290
КОНТРОЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ <i>Дуреев В.В.</i>	293
ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ТЕОРЕТИКО-ГРУППОВАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ЛОКАЛЬНОЙ ГРУППОЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ <i>Баранов В.А., Эверт У.</i>	295
МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ <i>Солдатов А.И.</i>	301
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ОТБОРА ДЛЯ КОМПТОНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ НА БАЗЕ ПИНХОЛА <i>Мудров М.А.</i>	305

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНЫХ НА МИРОВОМ РЫНКЕ СИСТЕМ ЦИФРОВОЙ РАДИОГРАФИИ (СЦР)

Клименов В.А., Касьянов В.А., Лебедев М.Б., Москалев Ю.А., Темник А.К., Штейн
М.М., Чахлов С.В.

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: mail@introscopy.tpu.ru

Интенсивное развитие товарообмена между государствами, обладающими различным уровнем контроля качества и внутреннего содержания поставляемой продукции предопределяет разработку высокоэффективных методов обнаружения несанкционированных включений как внутри государства, так и при таможенном и пограничном досмотре.

Термин «цифровая радиография» подразумевает совокупность методов радиационного неразрушающего контроля, позволяющих преобразовать поток ионизирующего излучения в цифровой сигнал с последующей визуализацией двумерной картины на экране монитора компьютера.

Цифровая радиография ввиду своих очевидных преимуществ перед традиционной радиографией на рентгеновскую пленку находит широкое применение в ведущих технически развитых странах, т.к. постоянное повышение технических параметров регистрирующей аппаратуры позволяет получать информацию в реальном масштабе времени по чувствительности, не уступая регистрации на пленку. Публикации по данной тематике направлены на анализ таких характеристик используемых установок как чувствительность, производительность, разрешающая способность. [1,2,3,4] Основные усилия ученых и производителей направлены на создание высокоэффективных источников и детекторов ионизирующего излучения, а также на компьютерную обработку полученных результатов с целью повышения информативности информации, распознавание несанкционированных включений, нахождение их местоположения, принятия решения об опасности контролируемого объекта. Наиболее существенные результаты в данном направлении отображены в работах [5,6,7,8]. Они заключаются в том, что используя различные методы фильтрации, наполнению, а также априорную информацию о конфигурации объекта контроля возможно обнаружение дефектов в пределах 0,3-0,5% от толщины.

Исходя из вышеизложенной доктрины в плане решения комплексной задачи создания системы цифровой радиографии в Институте неразрушающего контроля ТПУ были созданы и нашли широкое применение ускорители заряженных частиц - бетатроны, на энергию от 2

до 10 МэВ. Высокая конкурентоспособность на мировом рынке бетатронов определена успешным решением таких задач, как: большой угол излучения; оптимизация формы излучателя для уменьшения веса биологической защиты; компьютерное управление выбором параметров излучения по команде оператора; высокая стабильность параметров излучений. В таблице №1 приведены основные параметры бетатронов выпускаемых в ИНК ТПУ, как для целей дефектоскопии, так и для предотвращения террористической деятельности.

Основные параметры этих бетатронов приведены в Таблице 1.

Бетатроны ВЕАМ и МИБ-5 используются в мобильных досмотровых системах. Кроме этого, на основе установки ВЕАМ сделана двухпроекционная система для контроля авиаконтейнеров, а бетатроны МИБ-5 нашли применение в промышленных томографах для контроля больших толщин.

Полный комплект бетатрона на энергию 7.5 МэВ для досмотровых систем приведен на рисунке 1. К настоящему времени выпущено 18 таких установок.



Рис. 1. Комплект бетатрона МИБ-7.5Д

Таблица 1

№ п/п	Параметр	Тип бетатрона			
		ВЕАМ	МИБ-5	МИБ-7.5Д	РХВ-9Д (Шток-Т)
1	Максимальная энергия излучения, МэВ	3	5	7.5	9
2	Диапазон регулировки энергии, МэВ	-	2-5	2-7.5	4-9
3	Наличие режима дуальной энергии	-	-	+	+
4	Мощность дозы при максимальной энергии, Р/мин*м	2.0	4.2	7.5	20
5	Наличие режима низкой дозы	-	-	-	+
6	Частота импульсов излучения	400	400	200, 300	400
7	Размеры фокусного пятна (ширина x высота), не более, мм		0.2x2.3	0.3x2.5	0.3x2.5
8	Угол излучения в вертикальной плоскости, °			52	50
9	Относительное среднеквадратическое отклонение импульсной дозы за любые 10000 импульсов, не более, %	8	8	8	8
10	Относительное изменение средней мощности дозы, не более, %	10	10	10	10
11	Время установления мощности дозы на уровне 80% от среднего значения, не более, мс	-	30	30	30
12	Время переключения энергии в дуальном режиме, не более	Один цикл (2.5 мс)	Один цикл (2.5 мс)	Один цикл (5-3.3 мс)	Один цикл (2.5 мс)
13	Потребляемая мощность, не более, кВт		2.0	2.4	5.5
14	Основные размеры излучателя (диаметр x высота), мм		335x323x6	700x430x355	390x340
15	Масса излучателя, кг		71	115	176
16	Выпущено, шт.	108	6		6

Изготовленная на базе двух бетатронов по 9 МэВ досмотровая система позволила получить изображение внутреннего содержания автомобиля. Результат просвечивания приведен на рисунке 2.

Наряду с бетатронами в ТПУ совместно с ООО «Фотон» выпускаются рентгеновские аппараты по своим техническим характеристикам соответствующие лучшим зарубежным приборам.

Основные параметры этих аппаратов приведены в Таблице 2, а внешний вид излучателя представлен на рисунке 3.

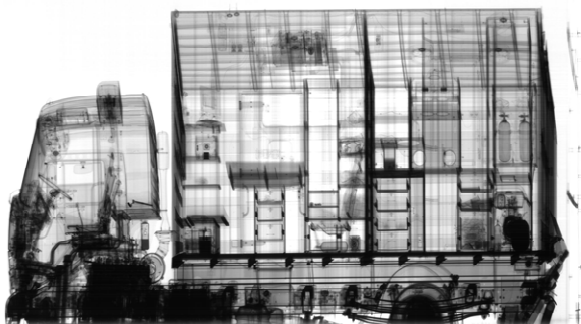


Рис. 2. Внутреннее содержание кузова автомобиля



Рис. 3. Излучатель рентгеновского аппарата с дуальными энергиями на максимальное напряжение 300 кВ

Аппараты на 200 и 300 кВ используются для контроля легковых автомобилей. Пример получаемых изображений приведен на рисунке 4.

Таблица 2

№ п/п	Параметр	Тип аппарата		
		РАП 160-2Д	РАП 200-4Д	РАП 300-4Д
1	Максимальное анодное напряжение, кВ	160	200	300
2	Максимальный средний анодный ток, мА	2	4	4
3	Диапазон регулировки напряжения высокой энергии, кВ	80-160	70-200	150-300
	низкой энергии, кВ	50-120	50-180	70-220
4	Угол выхода излучения (без коллиматора), °	40x60	40x360	40-60
5	Размеры фокусного пятна, мм	0.6x0.4	-	2.2x2.6
6	Длительность импульса излучения, мкс	150	280	380
7	Частота импульсов излучения, Гц	600	320	250
8	Размеры моноблока, мм	350x175x275	460x310x200	400x240x560
9	Масса моноблока, кг	16.3	28.3	36



Рис. 4 Рентгенограмма автомобиля, вид снизу

Для регистрации прошедшего через контролируемый объект ионизирующего излучения могут быть использованы три основных типа детекторов:

1. люминесцентные экраны совместно с ПЗС - камерой;
2. люминесцентные экраны совместно с фотодиодной матрицей;
3. сцинтилляционные кристаллы в комплексе с фотодиодной линейкой.

Наиболее отлаженной и нашедшей широкое применение является первая комбинация, она может использоваться совместно с источниками ионизирующего излучения в диапазоне от десятков КэВ до 25 МэВ, осуществляя обнаружение дефектов в материалах и изделиях не хуже 1% от контролируемой толщины. Однако данная система не позволяет осуществить контроль в непрерывном режиме. Внешний вид системы и результаты контроля сварного шва первой системой приведены на рис. 5 и 6.



Рис. 5. Дефектоскопический комплекс в полевых условиях

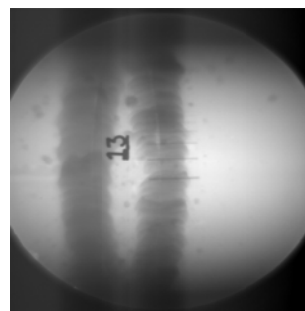


Рис.6. Рентгенограмма сварного шва трубы диаметром 200 мм

Наиболее перспективной системой, позволяющей осуществить непрерывный контроль с последующей компьютерной обработкой полученных результатов, является третья система, не уступающая по чувствительности двум предыдущим и обладающая таким преимуществом как отсутствие на визуальной картине геометрических искажений. Разработанная в нашем институте специализированная программа восстановления визуальной внутренней структуры контролируемого изделия «Диада» позволяет осуществить повышение информативной способности исходной информации, а так же вычислять координаты и геометрические размеры обнаруженных локальных неоднородностей либо несанкционированных включений.

На рис. 7-8 приведены результаты контроля, полученные с помощью системы цифровой радиографии на линейке детекторов, состоящей сцинтилляторов CsJ (Т1) и фотодиодов.

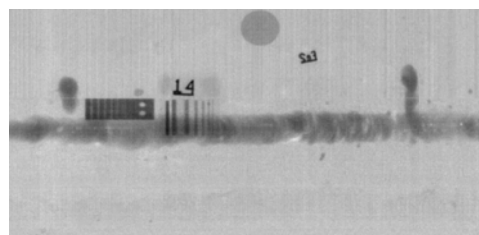


Рис.7. Рентгенограмма сварного шва трубы диаметром 1020 мм

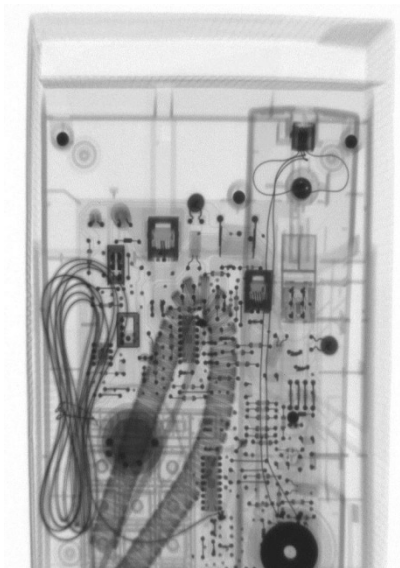


Рис.8. Печатная плата с недопустимым радиоэлектронным элементом

ЛИТЕРАТУРА

1. Неразрушающий контроль. Том 1. Справочник под ред. В.В. Ключева
2. M. Lovea и др. Обнаружение взрывчатых веществ при досмотре багажа. *Materials Evaluation*, v 67, №12, 2009, pp. 1342-1391
3. Rincu и O. Kleinberger Преимущество цифрового радиационного метода перед традиционным. *Materials Evaluation*, v 67, №5, 2009, pp. 499-506
4. Marinho C.A., Lopes R.T. и JMA Rebeto. Сравнение цифрового варианта радиационного метода с традиционным. *Materials Evaluation*, v 67, №5, 2009, pp. 529-539
5. Doucette Ed. Основы цифровой радиографии. *Materials Evaluation*, v 63, №10, 2005, pp. 1021-
6. Roerts J.A., Evans S.C., Reer M. J. Оптимизация технологии визуализации методом прямой цифровой радиографии. *Radiol. Prot.* 2006, 26, №3, с. 287-299
7. Пик Л., Кляйнбергер О. Цифровая радиография в дефектоскопии. *Мир измерений* 2010, № 6, с. 12-17
8. Канг –ИИ, Яою Ченг. Разработка рентгеновской цифровой системы визуализации и сбора данных. *Дефектоскопия*, 2009, № 5, с. 90-95

ТЕПЛОВОЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ: ИСТОРИЯ, СОСТОЯНИЕ, ТЕНДЕНЦИИ

Вавилов В.П.

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: vavilov@tpu.ru

История ИК термографии и теплового контроля

В научно-технической литературе принято считать, что инфракрасное (ИК) излучение было открыто в 1800 г. сэром У.Гершелем (Herschel), служившим астрономом при дворе английского короля Георга III. Однако еще до рождения Христа существование невидимых тепловых лучей было предсказано римским поэтом и философом Титом Лукрецием Каром в его знаменитой поэме «О сущности вещей» (“De Reum Natura”). В 1696 г. итальянский исследователь Делла Порта (Della Porta) обратил внимание, что тепло горящей свечи фокусируется большими серебряными вазами, размещенными в церквях. В 1770 г. французский ученый М.Пикте (Pictet) описал свои знаменитые эксперименты по фокусированию «тепла» и «холода». Также задолго до Гершеля Михайло Ломоносов, изучая проблему невидимого света, предложил телескоп для ночного видения (tubo noctoptico), и разработал зеркала с высоким коэффициентом отражения. В 1829 Л.Нобили (Nobili) разработал первую термопару, а устройство для визуализации теплового излучения было предложено Д.Гершелем (Herschel), сыном У.Гершеля. Данное устройство, названное эвапорографом, использовало зависимость интенсивности испарения летучих веществ от мощности сфокусированного излучения. Наконец, утверждение теории теплового излучения в ее современном виде датируется 1900 г., когда М.Планк (Planck) вывел формулу спектрального распределения мощности излучения абсолютно черного тела. Параллельные теоретические исследования проводились в те же годы А.Эйнштейном (Einstein), Г.Кирхгофом (Kirchhoff), В.Винном (Wien), Б.Б.Голицыным и др., что обеспечило быстрый прогресс ИК технологий в период между мировыми войнами. В Первую мировую войну С.Хоффманн (Hoffman) обнаруживал человека на расстоянии 120 м. В России на базе работ С.И.Покровского, Б.П.Козырева, В.А.Гурова и др. уже к 1934 г. были созданы береговые системы обнаружения, которые использовали термоэлементы и фокусирующие зеркала диаметром до 1,5 м. Первый бортовой оптико-механический тепловизор был разработан компанией Barnes (США) в 1954 г. Уже в 1960-е годы была достигнута температурная чувствительность тепловизоров $0,1^{\circ}\text{C}$ при частоте кадров 30 Гц. В эти годы в России М.М.Мирошников и

М.А.Собакин продемонстрировал сканирующий ИК радиометр с чувствительностью $0,03^{\circ}\text{C}$. Энергетический кризис 1970-х годов стимулировал появление измерительных тепловизоров в Швеции. Европейский прогресс в области тепловидения в период 1970-1990 гг. обеспечивался коммерческой продукцией шведской фирмы AGA (затем AGEMA Infrared Systems, ныне FLIR Systems). В 1986 г. эта фирма выпустила тепловизор с термоэлектрическим холодильником, что существенно улучшило пользовательские характеристики этого класса приборов. Например, модель 1988 г. Thermovision-400 массой 7 кг в течение несколько лет оставалась непревзойденным прибором для наружной съемки. В конце 1980х годов, американские военные разработки в области матричных ИК детекторов стали доступными для гражданских применений. В те годы за рубежом стали популярны тепловизоры фирмы Inframetrics, США, использовавшие миниатюрные холодильники Стирлинга. В России по-прежнему расширялись продажи продукции фирмы AGEMA Infrared Systems, разработавшей модели 500-й серии на базе неохлаждаемых матриц, в результате чего углубился разрыв между отечественной ориентацией на тепловизоры оптико-механического типа (известный российский тепловизор ИРТИС) и мировой тенденцией перехода на матричные приборы. В начале XX-го века появились тепловизоры, в которых были применены ИК детекторы на квантовых ямах, а число чувствительных элементов в матрицах достигло 640×480 и более при частоте полных кадров до 1 кГц. В эти же годы появились отечественные охлаждаемые матричные тепловизоры, однако проблема неохлаждаемых микроболометрических матриц до сих пор полностью не решена, несмотря на успешные разработки ряда российских организаций (ИФП СО РАН).

В свою очередь, тепловой неразрушающий контроль (ТНК) представляет собой одну из областей промышленного применения ИК термографии, историю которой можно проследить до 1930-х годов, когда Д.Никольс (Nichols) предложил оценивать качество горячего проката путем исследования поверхностного температурного поля, а П.Верно (Vernotte) разработал динамическую процедуру определения теплофизических свойств человеческой кожи. В 1960е годы тепловидение начало применяться для инспекции электрических установок и

радиоэлектронных компонент. Одна из первых процедур активного ТНК, то есть с использованием внешней тепловой стимуляции объектов контроля, была предложена в 1965 г. У.Беллером (Beller) при испытаниях корпусов ракет «Поларис». В 1967 г. Д.Грин (Green) выполнил базовые исследования по ТНК ТВЭЛов, в которых существенное внимание было уделено решению проблемы коэффициента излучения.

К концу 1970х годов ТНК опирался, в основном, на ИК технологию и не располагал собственной теоретической базой. Конкурентоспособность этого метода повысилась после внедрения «теплофизического» подхода, основанного на использовании методов теории теплопроводности. Основы этой теории были обобщены на Западе в ставшей «библией» теплофизиков книге Г.Карслоу и Д.Егера (Carslaw, Jaeger) [1] и ее российским аналоге - монографии А.В.Лыкова [2]. Решения ряда одно-, двух- и трехмерных задач активного ТНК были получены в те годы Д.Балажа (Balageas) [3], В.П.Вавиловым и Р.Тейлором (Taylor) [4], П.Маклафлином и Г.Мирчандани (MacLaughlin, Mirchandani) [5], Ю.А.Поповым и А.Е.Карпельсоном [6] и др.

В технической диагностике преимущества ИК термографии оказались бесспорными, в то время как активный ТНК испытывал периоды подъема и спада. Растущий интерес к этому методу в последние годы обусловлен взрывообразным расширением номенклатуры тепловизоров и достижениями в области компьютерной обработки результатов контроля.

Современные тепловизоры

В настоящее время ИК термография и ТНК представляют собой высокотехнологичную сферу теоретических и прикладных исследований, которая объединяет достижения в области теплопередачи, ИК технологии, материаловедения и цифровой обработки сигналов. Интерес к тепловидению обусловлен его универсальным характером, высокой производительностью испытаний и безопасным характером функционирования.

Ведущие производители применяют гибкую ценовую политику, в результате чего цена тепловизионных систем существенно зависит от размера матрицы и комплектации: наличия дополнительной оптики, программного обеспечения, фильтров и других аксессуаров. Цены на измерительные и показывающие тепловизоры сблизились и достигли уровня бытовой радиоаппаратуры высокого класса. Значительное число моделей располагается в диапазоне цен от 100 до 300 тысяч рублей, хотя их основной областью применения является диагностика электрооборудования. Цена универсальных тепловизоров обычно составляет 400-700 тысяч рублей, а для элитных моделей она достигает 1,5 миллионов рублей. Для научных

исследований разработаны гибкие тепловизионные комплексы, например, фирмы CEDIP-FLIR Systems, цена которых может достигать 10 миллионов рублей. Основными мировыми поставщиками тепловизоров являются фирмы FLIR Systems, NEC Avio, Electrophysics, Jenoptik, SAT Infrared, Wuhan Guide, Dali, Testo, Fluke, Mikron, XenICs, Raytheon и ряд других.

Современные тепловизоры второго поколения реализуют модульный принцип построения, используют охлаждаемые и неохлаждаемые матричные ИК детекторы. Разработка измерительных тепловизоров является сложной технической задачей, в особенности, в случае неохлаждаемых матриц. Можно сказать, что в полной мере эта задача не решена даже ведущими производителями, вследствие чего наименьшая достигнутая основная погрешность составляет $\pm 1\%$ или $\pm 1^\circ\text{C}$, в то время как температурная чувствительность может достигать 10 мК.

ИК тепловизоры (камеры) по областям применения подразделяются на: 1) приборы ночного видения для военных целей, ИК аэросъемки, пожарной съемки и т.п. (тепловизоры PalmIR-250 от Raytheon, Night Conqueror от Cincinnati Electronics и др.); 2) измерительные тепловизоры, используемые в технической диагностике и неразрушающем контроле (приборы общего применения и модули, например, ThermaCAM P640 и ThermoVision A40 от FLIR Systems, TH-9100 Pro от NEC Avio, Testo-880 от Testo и др.); 3) измерительные компьютерные комплексы, обеспечивающие весьма высокую температурную чувствительность и частоту кадров (ThermaCAM SC 6000 от FLIR Systems и SC 7000 от FLIR-CEDIP). Диапазон характеристик современных тепловизоров иллюстрируется Рис.1, где класс экономических приборов представлен моделью i3, продававшейся в России в 2011 г. по цене 39 тысяч (!) рублей, и системой для научных исследований SC7000, цена которой с множеством аксессуаров может достигать 11 миллионов рублей (!).

Источники тепловой стимуляции

Наряду с прогрессом тепловизоров в качестве средств измерения температуры, эффективность ТНК по-прежнему существенно зависит от оптимизации источников тепловой стимуляции (источников нагрева или охлаждения). Оптический нагрев остается наиболее используемыми во многих процедурах ТНК, в особенности там, где требуется мощный импульсный нагрев. В этом случае типичны ксенонные импульсные лампы, собираемые в батарею и имеющие мощность до 1,6 кДж каждая (длительность светового импульса около 5 мс). В этом случае необходимо обеспечить высокую степень поглощения оптической энергии.



- а) – тепловизор FLIR i3 (формат матрицы 60x60, спектральный диапазон 7,5-13 мкм, температурная чувствительность <150 мК, полная частота кадров 9 Гц, масса 0,34 кг);
 б) – тепловизионная система FLIR-CEDIP SC7000 для научных исследований (формат матрицы 320x240 или 640x512, спектральный диапазон 3-5 мкм или 8-12 мкм, температурная чувствительность <18 мК, полная частота кадров 380 Гц (до 30кГц в режиме окна), масса 4,95 кг)

В последнее десятилетие стали популярными другие способы тепловой стимуляции. Прежде всего, речь идет об ультразвуковой (УЗ) синхронной и импульсной ИК термографии (английские термины: ultrasonic lock-in и burst thermography, sonic IR imaging и thermosonics, торговые марки: VibroIR и SonicIR). Метод является развитием так называемой вибротермографии, будучи основанным на тепловых феноменах, сопровождающих механический гистерезис и внутреннее трение. Последний эффект оказался наиболее эффективным при обнаружении трещин малого раскрытия (широкие трещины генерируют тепло в устьях, что позволяет прогнозировать направление развития трещин). Обычно стимуляцию осуществляют с помощью пьезоэлектрических или магнитоэлектрических устройств мощностью до нескольких киловатт на частоте около 22 кГц, однако в Японии выполнены многообещающие исследования по обнаружению трещин в металлических фермах автомобильных мостов, которые подвергаются циклическому нагружению за счет прохождения по ним грузовых автомобилей. Исследования, проведенные в Ливерморской национальной лаборатории США, Университете Уэйна (США),

Штуттгартском университете (Германия) и в последнее время в Томском политехническом университете, показали, что создаваемая при УЗ стимуляции карта дефектов существенно отличается от случая оптического нагрева за счет выборочной стимуляции дефектов различного типа. Основная проблема метода: возможность перехода неразрушающего контроля в разрушающий при достаточно большой мощности ультразвука. Привлекательная черта метода – его применимость к неокрашенным металлическим изделиям сложной формы, где возможно образование усталостных трещин.

На Рис. 2 показана характерная термограмма пластины из углепластика с многочисленными трещинами, стимулируемой ультразвуком с помощью магнитоэлектрического преобразователя; отчетливо виден слегка нагретый корпус преобразователя и несколько продольных трещин создающих сигнал до 3°C при практически холодном изделии; характерные тепловые аномалии также имеют место на краях изделия.

Другая новая разновидность ТНК комбинирует ИК термографию и вихретоковую стимуляцию металлов, что позволяет обнаруживать поверхностные и неглубокие трещины. Данный метод применим также к углепластиковым композитам и C/C-SiC керамике.

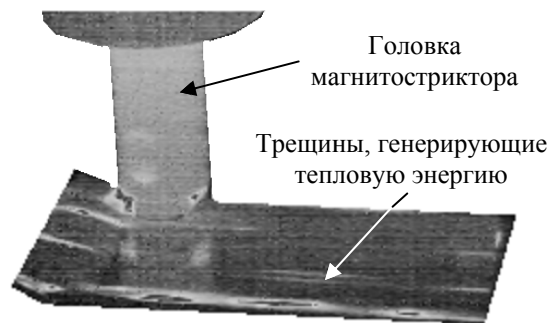


Рис. 2. ИК термограмма образца из углепластика с продольными трещинами

Обработка ИК термограмм

Повышение потенциала ТНК напрямую связано с использованием современных методов обработки температурной информации, которую представляют в виде трехмерного вектора данных, причем одна размерность вектора есть номер термограммы, или время.

Стандартная обработка отдельных термограмм не отличается от обработки изображений другого типа: оптических, рентгеновских, ультразвуковых и т.п. Также имеется значительное число алгоритмов обработки динамических данных, как стандартных, так и специальных, в частности, основанных на особенностях механизма теплопроводности в телах с дефектами. Наиболее часто применяют следующие процедуры: 1) метод оптимального детектирования (ТНК при

достижении максимальных сигналов в дефектных зонах); 2) метод раннего детектирования (сигнал над дефектами мал, но вследствие слабой диффузии тепла хорошо воспроизводятся форма и края дефектов); 3) нормализация данных (подавление эффекта неравномерного нагрева); 4) одно- и двухмерный Фурье-анализ; 5) вейвлет-анализ, близкий по принципу к преобразованию Фурье, но позволяющий позиционировать дефектные сигналы не только по частотам, но и во времени (корни данного метода прослеживаются к периоду «вейвлет-революции» конца 1980-х годов); 6) внедрение в ТНК принципов томографического анализа; 7) полиномиальная или экспоненциальная аппроксимация зашумленных данных (разновидность метода – реконструкция термографического сигнала с использованием полиномиальной аппроксимации и производных; способ запатентован фирмой Thermal Wave Imaging, США); 8) метод анализа главных компонент, который, по мнению автора, является наиболее эффективным, наряду с Фурье-анализом, методом повышения отношения сигнал/шум и снижения избыточности информации; 9) использование элементов искусственного интеллекта, в особенности, нейронных сетей.

В качестве примера реализации метода тепловой томографии на Рис. 3 приведен пример тепловой томограммы 3-х дефектов в углепластике на глубине 0,8 мм в сравнении с оптимальной исходной термограммой. На изображении отмечено несколько артефактов, которые в данном случае возникают в виде тепловых «отпечатков» дефектов, находящихся вне выделенного слоя.

Области применения ТНК

Следуя словам Л.З.Криксунова, известного советского эксперта в области ИК технологий и автора превосходного справочника 1980х годов [7], следует отметить, что описать фактические и потенциальные применения ТНК невозможно даже в толстой книге. Ограничимся тривиальным утверждением, что ИК термографическая техническая диагностика в промышленности, а также многочисленные аспекты ночного видения, доказали свою универсальность и экономическую значимость при контроле энергообъектов, в особенности, электроустановок, трасс трубопроводов, зданий и сооружений, лесных пожаров, металлургии и т.д. Именно в указанных областях объем методических документов на уровне национальных и международных стандартов весьма велик (стоит упомянуть стандарт ISO 9869-1998 “Тепловая изоляция. Элементы строительных конструкций. Определение теплового сопротивления и тепловой проводимости в условиях эксплуатации», а также разрабатываемый в настоящее время с участием

автора стандарт ISO по испытаниям электрооборудования).

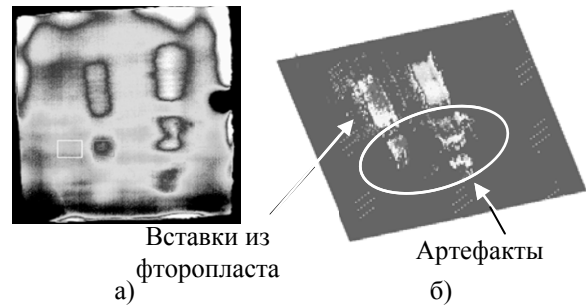


Рис. 3. Односторонний ТНК стандартного образца из углепластика толщиной 1 мм:

- а – оптимальная исходная ИК термограмма;
- б – тепловая томограмма слоя 0,6-1,0 мм

В свою очередь, активный ТНК материалов является быстро развивающейся, по крайней мере, в передовых странах, областью неразрушающих испытаний, что, в первую очередь, вызвано расширяющимся применением композиционных материалов и теплозащитных покрытий в авиакосмической, энергетической и приборостроительной отраслях. В таких материалах тепловой метод выявляет дефекты, не обнаруживаемые традиционными методами; более того, уникальная производительность ТНК позволяет проверять до 100% поверхности объектов контроля, что весьма важно, например, в авиации. Поэтому усиливается роль ТНК в качестве скринингового метода, дополняющего другие методы испытаний.

В авиакосмической промышленности основные области применения ТНК: 1) обнаружение воды в сотовых панелях эксплуатируемых самолетов и теплоизоляции космических челноков; 2) контроль скрытой коррозии алюминиевых панелей самолетов, прежде всего, заклепочных и клеевых соединений; 3) обнаружение производственных и эксплуатационных дефектов в композиционных панелях и заплатках при ремонте, а также в сотовых конструкциях (отслоение сот, заполнение ячеек клеем и т.п.); 4) контроль турбинных лопаток (блокировка каналов, дефекты теплозащитных покрытий и усталостные трещины); 5) общие испытания ракет и космических челноков на стартовой площадке и в открытом космосе. Эти же области применения характерны при испытаниях судов, изготовленных из композиционных материалов.

Контроль качества сварки осуществляют несколькими способами. Наблюдение процесса сварки в ИК диапазоне позволяет оптимизировать параметры сварки. Сварные соединения проверяют на наличие пор, трещин и так называемых «целующихся» дефекты (последние характерны для диффузионной сварки). По-видимому, в ближайшем будущем появятся

портативные тепловые дефектоскопы для контроля точечной сварки в автомобильной промышленности.

Тепловой контроль коррозии толстостенных стальных оболочек наземных цистерн, резервуаров и трубопроводов находится в стадии развития. Принципы контроля разработаны, но проблема нагрева массивных неокрашенных или окрашенных светлой краской изделий из стали ожидает практического решения, в частности, из-за сравнительно низкого коэффициента излучения/поглощения оптического излучения. В ряде случаев нагрев металлов можно производить, например, с помощью вихревых токов или ультразвука. Существуют также области применения активного ТНК, заслуживающие отдельного обзора, например, диагностика объектов искусства, обнаружение противопехотных мин и др. [8].

Тенденции развития ТНК

В отношении ИК тепловизоров постоянной тенденцией является дальнейшее улучшение температурной чувствительности и пространственного разрешения, а также повышение быстродействия (частоты смены термоизображений). Такие тепловизоры позволяют контролировать высокотеплопроводные материалы, в которых избыточные температуры и сигналы в дефектных зонах имеют малую амплитуду. По-видимому, более эффективными и доступными станут тепловизионные модули в качестве базового элемента портативных устройств ТНК с гибкой архитектурой. Кроме того, измерительные задачи ТНК требуют улучшения метрологических характеристик тепловизоров.

Продолжится разработка новых способов и устройств тепловой стимуляции с целью снизить шум радиационной природы. В ряде случаев весьма эффективной представляется ультразвуковая стимуляция структурных неоднородностей материалов. При этом необходимо соблюдать компромисс между увеличением поглощенной энергией и неразрушающим характером испытаний. В случае металлов, в особенности, прутков и труб, эффективен индукционный нагрев. Лазеры, которые до сих пор редко используются в практическом ТНК, могут испытать возрождение в качестве мощного и гибкого оптического источника нагрева, работающего вне спектрального диапазона чувствительности тепловизоров.

Обработка результатов контроля будет по-прежнему направлена на улучшение отношения сигнал/шум. В качестве простых и эффективных процедур обработки данных утвердились Фурье-анализ и метода анализа главных компонент, которые могут быть дополнены нейронными сетями. Параллельно будут развиваться алгоритмы тепловой дефектометрии, а экспоненциальный рост мощности компьютеров позволит практически применять метод нелинейной многопараметрической подгонки, позволяющий оценивать параметры как самого контролируемого материала, так и процедур испытаний: температуропроводность материала, поглощенную энергию, коэффициент теплообмена со средой и др. Появятся трехмерные алгоритмы дефектометрии, то есть такие, которые учитывают размеры оцениваемых дефектов.

Тепловой контроль подтвердит свою роль в качестве скринингового метода, однако, если описанные выше проблемы ТНК будут успешно решены, то в некоторых случаях этот метод может доказать свою уникальность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Carslaw H.S., Jaeger T.S. Conduction of heat in solids. Oxford: Oxford Univ. Press, Oxford, 1959. 580 p.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967. 604 с.
3. Balageas D.L., Krapez J.-C, Cielo P. Pulsed photo-thermal modeling of layered materials // J. Appl. Physics. 1986. V. 59. No.2. P.348-357.
4. Vavilov V., Taylor R. Theoretical and practical aspects of the thermal NDT of bonded structures // Res. Techn.in NDT / ed. by R. Sharpe. V. 5. London: Academ. Press, 1982. P.239-280.
5. MacLaughlin P.V., Mirchandani H.G. Aerostructure NDT evaluation by thermal field detection (Phase II): Final Rep., AIRTASK, Naval Air System Command AIR-310G. Washington., 1984. 198 p.
6. Попов Ю.А., Карпельсон, Строков В.А. и др. Тепловой контроль качества многослойных изделий // Дефектоскопия. 1976. №3. С. 76-81.
7. Криксунов Л.З. Справочник по основам ИК техники. М.: Сов. Радио, 1978. 400 с.
8. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: Спектр, 2009. 543 с..

МНОГОМАСШТАБНЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ И УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ДАННЫМ ТЕНЗОМЕТРИИ, КАРТИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИИ НА ПОВЕРХНОСТИ И АКУСТО-ЭМИССИИ

Панин В.Е., Панин С.В., Бяков А.В., Бурков М.В., Любутин П.С.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

634021, Россия, г. Томск, пр. Академический 2/4

E-mail: biakov.anton@gmail.com

Введение

Для анализа процессов деформации и разрушения применяются различные разрушающие и неразрушающие подходы. Особое место среди неразрушающих занимают методы, позволяющие регистрировать изменения непосредственно в процессе нагружения *in situ*. Комбинированное применение этих методов, которые в зависимости от принципа действия обладают чувствительностью к носителям на различных масштабных уровнях, позволяет получить более полную картину процесса. Так совмещение методов тензометрии и акустической эмиссии (АЭ) активно используют в СибНИА им. Чаплыгина [1,2].

Совместное использование АЭ, метода картирования деформации на поверхности (корреляции цифровых изображений DIC) и тензометрии позволяет одновременно регистрировать локализацию деформации и разрушения на различных масштабных уровнях. Основным вопросом, при этом, является: при каких условиях подобная локализация сопровождается повышением значений информативных параметров, отражающих развитие деформации на микро-, мезо- и макро масштабных уровнях. В качестве таких параметров для метода АЭ использовали активность событий dN_{Σ}/dt ; для DIC - интенсивность деформации сдвига γ , для тензометрии – $d\sigma/dt$, производная внешнего приложенного напряжения по деформации, либо времени.

Удобным и наглядным подходом к выявлению активизации деформационных процессов является выделение характерных стадий деформации и разрушения, связанных с соответствующими механизмами, носителями и деформационными структурами [3].

Материалы и методика исследований

В работе применяли комбинированный метод для исследования процессов локализованной деформации в образцах из углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ) и из алюминиевого сплава Д16АТ с различными размерами концентратора напряжений – центрального отверстия с диаметрами 7, 10, 13 мм для образцов из УУКМ и диаметрами 2, 3, 4, 5 мм для образцов из Д16АТ.

УУКМ представляет собой псевдоизотропный композит из слоев однонаправленных углеродных лент $[0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 90^\circ]$, спеченных в углеродной матрице. Образцы из УУКМ (рис. 1, а) вырезали на прецизионном отрезном станке Struers Secotom-10 (диск с алмазным режущим слоем на металлической основе, охлаждение водой) из плит композита толщиной 15 мм. Образцы из Д16АТ (рис. 1, б) вырезали из листа, материал испытывали в состоянии поставки, дополнительной термообработки не проводили.

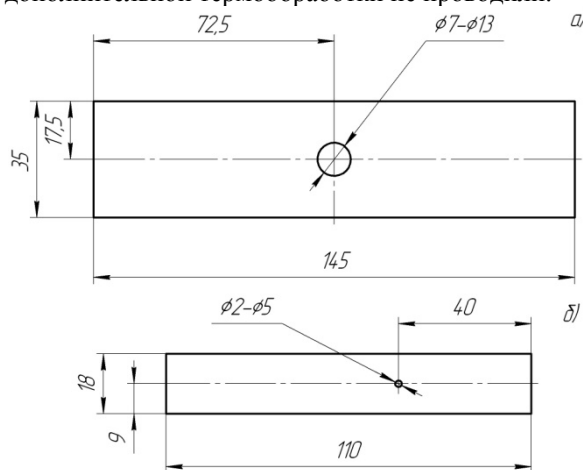


Рис. 1. Схемы образцов: а) образец из УУКМ, толщина 4 мм; б) образец из Д16АТ, толщина 1 мм

Образцы испытывали на одноосное статическое растяжение на электро-механической машине Instron 5582 со скоростью перемещения подвижного захвата 0,3 мм/мин. Данные тензометрии регистрировали с использованием штатного оборудования испытательной машины (встроенного тензодатчика).

Регистрацию АЭ осуществляли с помощью программно-аппаратного измерительного комплекса регистрации сигналов АЭ на базе ПК [4]. В качестве основного информативного параметра данных АЭ рассчитывали производные от накопления сигналов АЭ по времени (активность акустической эмиссии $\dot{N}_{\Sigma} = dN_{\Sigma}/dt$).

Фотографирование поверхности осуществляли с помощью фотокамеры Canon EOS 550D, оснащенной длиннофокусным объективом Canon EF-S 100-400mm 1/4-5.6 IS. Размеры области для расчета интенсивности деформации сдвига

выбирались с учетом того, чтобы гарантировано наблюдать формирование и развитие в ней макрополос деформации. Например, для образцов с отверстием выбирали область изображения размером 3300×4950 пикселей (физические размеры ~35×52.5 мм), расположенную в центре образца, вокруг отверстия.

Применение одновременной регистрации несколькими методами позволило проследить и сравнить регистрируемые параметры на протяжении всего времени эксперимента.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Представление результатов можно разделить на 2 части по типу испытываемых образцов: образцы из Д16АТ (более подробное описание результатов, полученных по алюминиевым образцам, можно найти в работах [5,6]) и образцы из УУКМ.

Образцы Д16АТ с отверстием

Диаграммы нагружения и графики производной $d\sigma/dt = f(t)$ для образцов с различным диаметром отверстия представлены на рис. 1. Видны следующие особенности:

- Независимо от диаметра отверстия упругая деформация в образцах ограничена уровнем внешней нагрузки $\sigma \leq 50$ МПа, что в несколько раз ниже, чем в образцах без КН;

- С ростом диаметра разрушающее удлинение для всех образцов без исключения падает, в то время как предел прочности имеет обратный тренд, исключая образец с диаметром отверстия 5 мм.

- На диаграмме « σ - ϵ » образца с диаметром $\varnothing 5$ мм напряжение течения начинает ощутимо снижаться после достижения уровня внешнего напряжения $\sigma \approx 200$ МПа. По мнению авторов, есть некий порог, при превышении которого действие концентратора напряжений приводит к быстрому переходу к макролокализации деформации и разрушению образца (что подтверждается и минимальной пластичностью данного образца).

Анализируя графики производной $d\sigma/dt$ можно выделить 3 стадии, 2 из которых довольно хорошо аппроксимируются прямыми линиями. Исследуя удельные длительности (длительность стадии, отнесенная к времени всего эксперимента) этих стадий, скорости изменения значений $d\sigma/dt$, для каждого из образцов можно выделить следующее:

- Если принять, что стадия_{тенз} 1 связана с лидирующей ролью развития деформации на микромасштабном уровне, то следует считать, что по мере увеличения диаметра отверстия удельная продолжительность однородного развития деформации на микроуровне сокращается, а на макроуровне остается примерно постоянной;

- Удельная длительность второй стадии_{тенз} 2 возрастает по мере увеличения диаметра отверстия, имея практически постоянное

значение для двух групп образцов: с небольшим ($\varnothing 3$ мм) и большим ($\varnothing 4-5$ мм) диаметром отверстия. Этот результат, по нашему мнению, связан с лидирующей ролью мезомасштабного уровня на второй стадии;

- Вторая стадия_{тенз} 2 соответствует параболическому участку кривых течения. Выход же на третью стадию_{тенз} 3 кривой $d\sigma/dt$ соответствует передаче ведущей роли макромасштабному уровню. Здесь напряжение течения начинает заметно падать. Фактически - это макролокализация деформации, но не сопровождаемая формированием шейки, поскольку коэффициент деформационного упрочнения не принимает отрицательных значений.

В дальнейшем данные АЭ и DIC сравнивали со стадийностью по данным тензометрии, как наиболее достоверного способа интегральной оценки напряженно-деформированного состояния нагруженных материалов.

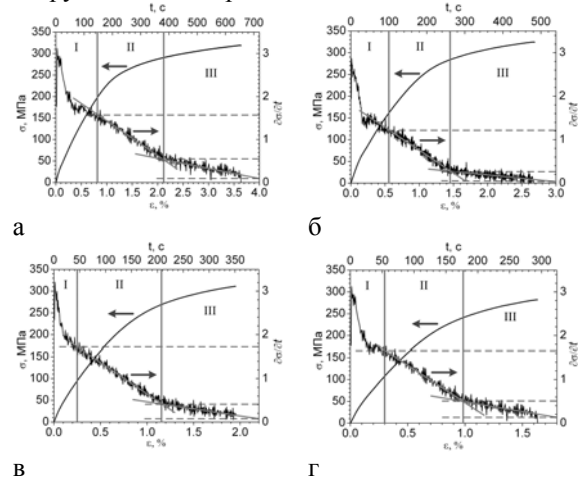
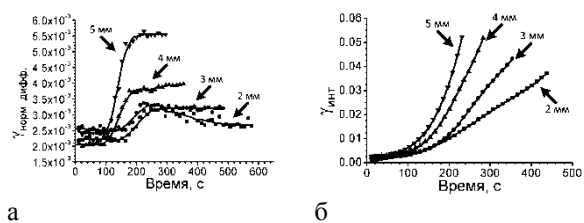


Рис. 2. Диаграммы нагружения и графики производной $d\sigma/dt$: а) $\varnothing=2$ мм; б) $\varnothing=3$ мм; в) $\varnothing=4$ мм; г) $\varnothing=5$ мм

Анализ распределений деформаций на мезомасштабном уровне проводили путем обработки изображений интегральным и дифференциальным методом (более подробно эта методика была описана в работе [7]). В первом случае вектора перемещений строили путем сопоставления первого (начального) с каждым последующим изображениями, в то время как при дифференциальном способе расчета сравнивали текущее и последующее изображения поверхности деформируемого образца. На рис. 3 приведены зависимости среднего значения интенсивности деформации сдвига, полученные при анализе изображений интегральным и дифференциальными способами.



а б
Рис. 3. Зависимость интенсивности деформации, рассчитанная, а) дифференциальным; б) интегральным способами: 1) Ø2 мм, 2) Ø3 мм, Ø4 мм, Ø5 мм

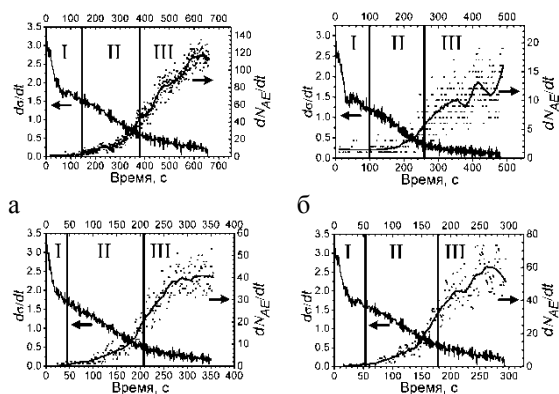
Анализ данных для интегрального метода расчета показывает, что графики изменения $\gamma_{\text{инт}}$, построенные для образцов с любым диаметром отверстия, без исключения имеют вид параболы (рис. 3, б).

На рис. 3, а приведены графики зависимости ИДС, рассчитанные дифференциальным способом. Аппроксимируя данные кривые гладкой средней можно выделить три характерных участка (по аналогии с подходом, примененным при анализе диаграмм нагружения, мы назовем их стадии ИДС дифф.). Первая стадия ИДС дифф 1 при этом характеризуется минимальным значением ИДС и постоянство значение последнего на ней, по всей видимости, связано с небольшим разрешением оптической системы, использовавшимся при проведении съемки изображений поверхности образцов. Стадия ИДС дифф 2 является переходной и должна соответствовать лидирующей роли мезомасштабного уровня деформации. Наконец, на третьей стадии ИДС дифф 3 значение интенсивности деформации сдвига сохраняет практически постоянное значение (за исключением образца с диаметром отверстия 2 мм), что, наиболее вероятно, связано с лидирующей ролью макромасштабного уровня.

В полном соответствии с методиками анализа данных тензометрии и картирования деформации на поверхности были обработаны данные регистрации акустической эмиссии, которые трактовали в терминах активности АЭ $dN_{\text{АЭ}}/dt$ (рис. 4), данные которой были сглажены аппроксимирующей кривой.

Отметим, что наличие длительных переходных участков на кривых, не позволившее использовать процедуру кусочно-линейной аппроксимации, вызвало необходимость разбить стадию тенз 2 на две самостоятельных подстадии: переходную и линейную. Видно, что протяженность стадии акт АЭ 1 достаточно хорошо согласуются с результатами выделения стадий для данных тензометрии, поскольку обе стадии соответствуют развитию упругой и начальной пластической деформации в образце. Наблюдаемое различие, может быть связано как с чувствительностью аппаратуры регистрации АЭ, так и использованными методами математической

обработки для сглаживания зависимостей $dN_{\text{АЭ}}/dt$



а б в г
Рис. 4. Совмещенные графики производной внешнего деформирующего напряжения $d\sigma/dt$ и зависимости активности АЭ $dN_{\text{АЭ}}/dt$ от времени нагружения. Диаметр отверстия: а) Ø2 мм; б) Ø3 мм; в) Ø4 мм; г) Ø5 мм

Две следующие подстадии акт АЭ 2(1) и 2(2) отражают постепенное возрастание активности АЭ до достижения максимальной скорости ее роста. Их суммарная длительность (в том числе удельная) для всех диаметров отверстий выше, чем таковая для данных тензометрии. Для всех исследованных образцов конец стадии акт АЭ 2(2) всегда наступал позднее, нежели время завершения второй стадии согласно данным тензометрии. Данный результат может быть связан как со спецификой использованной методики выделения стадий, так и с тем, что снижение коэффициента деформационного упрочнения не обязано сопровождаться резким уменьшением активности деформационных процессов на микромасштабном уровне, которые согласно литературным данным являются основными источниками АЭ сигналов.

Важным является и следующее наблюдение. Удельная длительность всех стадий АЭ хоть и не имеет строго постоянного значения для образцов с отверстиями различного диаметра, но в целом можно заключить, что остается примерно постоянной. Это также справедливо и для стадии акт АЭ 3, удельная длительность которой является максимальной. Характер изменения зависимости $dN_{\text{АЭ}}/dt$ на данной стадии практически невозможно аппроксимировать прямой линией (см. рис. 4). В то же время активность АЭ на данной стадии постепенно снижается, что обусловлено процессами макролокализации деформации, предшествующими разрушению образца. Полученные результаты частично объясняют тот факт, что, по сравнению с данными тензометрии и картирования деформации поверхности наступление стадии 3 в методе АЭ фиксируется позднее.

Образцы из УУКМ с отверстием

На рис. 5 приведены диаграммы нагружения образцов с различным диаметром центрального отверстия и зависимости производной внешнего деформирующего напряжения по времени от времени нагружения $d\sigma/dt = f(t)$, а также все диаграммы нагружения, собранные на одном графике (рис. 5, г). Сопоставление приведенных экспериментальных результатов позволяет выделить следующие закономерности:

- Диаграммы нагружения всех трех образцов весьма хорошо соответствуют друг другу, отличаясь лишь величиной удлинения до разрушения (рис. 5, г);

- Увеличение диаметра отверстия обуславливает снижение относительного удлинения и напряжений, соответствующих моменту разрушения (рис. 3, г), что может быть связано с большей степенью локализации деформации с самого начала нагружения;

- На графиках производной $d\sigma/dt = f(t)$ для всех типов образцов путем кусочно-линейной аппроксимации можно выделить три характерных участка (стадии), (рис. 5, а-в). При этом третий участок характеризуется небольшим ростом параметра $d\sigma/dt$, что может быть связано с натяжением все большего числа продольно ориентированных волокон, которые могли быть не вовлечены в сопротивление деформированию на начальном этапе нагружения из-за отклонения от траектории укладки при формовании [8].

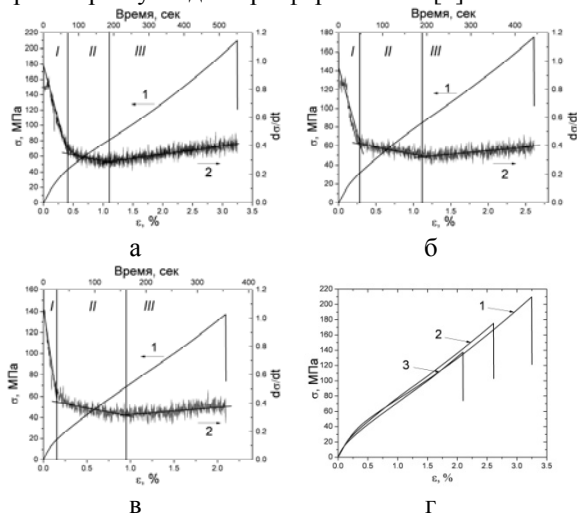


Рис. 5. Диаграммы нагружения (1) и графики производной $d\sigma/dt$ (2): а) $\varnothing=7$ мм; б) $\varnothing=10$ мм; в) $\varnothing=13$ мм; г) сводный график кривых нагружения

Последующий анализ зависимостей $d\sigma/dt = f(t)$ проводили в терминах стадийности, по аналогии с подходом для алюминиевых образцов. Анализ зависимостей $d\sigma/dt = f(t)$ в терминах стадийности позволил выявить следующие характерные особенности.

- Продолжительность (и доля) стадии тенз 1 снижается с увеличением диаметра отверстия;

- Начало второй стадии по мере возрастания диаметра отверстия все ближе сдвигается ко времени начала испытаний. В то же время, удельная продолжительность стадии тенз 2 при этом возрастает.

- Удельная длительность стадии тенз 3 с ростом диаметра несколько снижается.

- Скорость изменения значений $d\sigma/dt$ на первой стадии тенз 1 по мере увеличения диаметра отверстия возрастает. На второй стадии тенз 2 характер изменения скорости $d\sigma/dt$ с увеличением диаметра имеет линейный вид. На стадии тенз 3 скорость изменения $d\sigma/dt$ остается практически постоянной для всех образцов.

На рис. 6 приведены зависимости среднего значения интенсивности деформации сдвига $\gamma_{\text{инт}}$, полученные при анализе изображений интегральным (б) и дифференциальным (а) способами. Видно, что графики для образцов с любым диаметром отверстия, рассчитанные интегральным методом имеют практически линейный вид и весьма подобны.

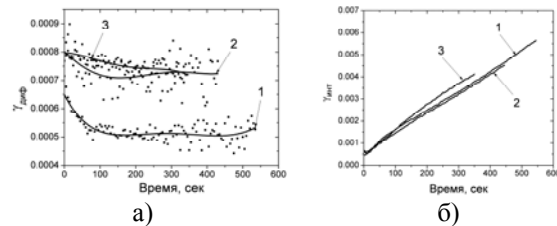


Рис. 6. Зависимости интенсивности деформации сдвига, рассчитанные: а) дифференциальным, б) интегральным способами; 1) $\varnothing 7$, 2) $\varnothing 10$, 3) $\varnothing 13$ мм

На аппроксимированных кривых ИДС (рис. 6, а) можно также выделить три характерных участка (по аналогии с подходом, примененным при анализе диаграмм нагружения, мы назовем из стадии ИДС дифф.). Графики для образцов с диаметрами 7 и 10 мм хорошо коррелируют с данными тензометрии, в то время как для образца с диаметром 13 мм наблюдается некоторое расхождение.

В полном соответствии с методиками анализа данных тензометрии и корреляции цифровых изображений были обработаны данные регистрации акустической эмиссии, которые трактовали в терминах активности $AЭ \frac{dN_{AЭ}}{dt}$ (рис. 7). Выделение стадий с использованием процедуры кусочно-линейной аппроксимации в данном случае не всегда представлялось математически корректным, поэтому данные были аппроксимированы гладкой средней кривой.

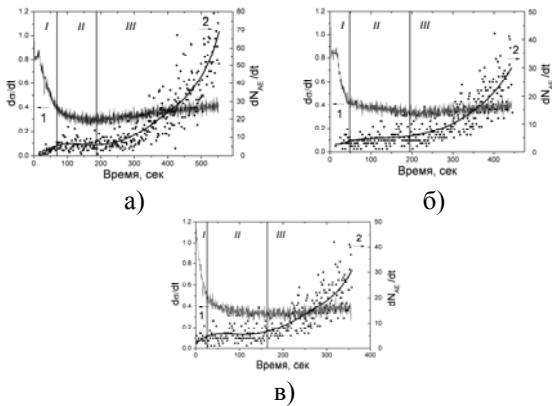


Рис. 7. Совмещенные графики производной внешнего деформирующего напряжения $d\sigma/dt$ (1) и зависимости активности АЭ $dN_{AЭ}/dt$ (2) от времени нагружения: а) $\varnothing 7$; б) $\varnothing 10$; в) $\varnothing 13$ мм

Анализируя стадийность по данным АЭ видно, что протяженность стадии акт АЭ I достаточно хорошо согласуются с результатами выделения стадий для данных тензометрии, поскольку обе стадии соответствуют развитию упругой и начальной пластической деформации в образце. Безусловно, есть некоторое различие, которое может быть связано как с чувствительностью аппаратуры регистрации АЭ, так и использованными методами математической обработки для сглаживания зависимостей $dN_{AЭ}/dt$. Особенно хорошо заметно, что начало роста активности акусто-эмиссии соответствует точке перегиба кривой $d\sigma/dt$.

В целом стадийность данных тензометрии и АЭ достаточно хорошо согласуется между собой.

Заключение

Комбинированное применение методов DIC, АЭ и тензометрии позволяет исследовать развитие процессов деформации и разрушения. Для алюминиевых образцов на начальных стадиях нагружения метод акустической эмиссии является самым чувствительным к деформационным процессам. С дальнейшим увеличением внешней нагрузки метод корреляции цифровых изображений (DIC) более точно описывает смену ключевой роли развития деформации с мезо- на макромасштабный уровень.

Для композиционных образцов метод акустической эмиссии обладает высокой чувствительностью и позволяет описать процессы внутри материала, данные тензометрии, описывая макроотклик всего образца на приложение нагрузки, позволяет выявить переход от одной стадии деформации к другой. Метод DIC позволяет визуализировать деформационные процессы на поверхности материала с их численной оценкой.

Полученные данные предлагается использовать для неразрушающего контроля конструкционных материалов, путем выделения

характерных стадий развития деформации и момента, предшествующего разрушению. Дальнейшее развития этого способа НК связано с применением его для усталостных испытаний волокнистых КМ.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Комплексного проекта г/б исследований СО РАН III.20.1.3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Тихонравов А.Б. и др. Использование метода акустической эмиссии и тензометрии при проверке остаточной прочности самолета. – Дефектоскопия, 2008, №2, с. 28-35.
2. Степанова Л.Н., Лебедев Е.Ю., Кабанов С.И. и др. Исследование разрушения образцов из стеклопластиков с использованием методов акустической эмиссии и тензометрии. – Дефектоскопия, 2009, №2, с. 39-47.
3. Ключниченко А.Б., Панин С.В., Старцев О.В. Исследование деформации и разрушения на мезо и макромасштабном уровнях армированных пластиков при статическом и циклическом растяжении. Физическая мезомеханика, 2002. –Т. 5. – №3. – С. 101-116.
4. Панин С.В., Бяков А.В., Гренке В.В., Шакиров И.В., Башков О.В. Разработка и испытание лабораторного стенда регистрации и анализа данных акустической эмиссии. Автометрия, 2011, Т. 47, №1, с. 115-128.
5. Панин С.В., Бяков А.В., Любутин П.С., Башков О.В. Стадийность локализованной пластической деформации при растяжении образцов сплава Д16АТ по данным акусто-эмиссии, картирования деформации на поверхности и тензометрии. Часть 1. Образцы с отверстиями различного диаметра. Дефектоскопия, 2011, №7, с. Хх-хх (принято к печати).
6. Панин С.В., Бяков А.В., Любутин П.С., Башков О.В. Стадийность локализованной пластической деформации при растяжении образцов сплава Д16АТ по данным акусто-эмиссии, картирования деформации на поверхности и тензометрии. Часть 2. Образцы с надпилами различной глубины. Дефектоскопия, 2011, №7, с. Хх-хх (принято к печати).
7. Панин С.В., Любутин П.С., Буякова С.П. и др. Исследование поведения пористой керамики при одноосном сжатии путем расчета мезоскопических деформационных характеристик. // Физическая мезомеханика, 2008, Т. 11, №6, с. 77-86.
8. C.C. Chamis, S.K. Mital Mesomechanics applied to composites – a matter of scale //Mesomechanics 2000. Proc. of the 3rd Int. Conf for Mesomechanics. V.2,- Xi'an, China, 2000, pp.623-630.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ В КАБЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Гольдштейн А.Е., Редько В.В., Федоров Е.М.

Институт неразрушающего контроля

Томского политехнического университета, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: algol@tpu.ru

Кабельная промышленность является одной из ведущих и наиболее бурно развивающихся отраслей отечественной и зарубежной промышленности. Среди наиболее ответственных сфер применения кабельных изделий – энергетика, авиация, космическая, угольная, нефтяная и газовая отрасли. Номенклатура кабельных изделий очень разнообразна. Качество выпускаемой кабельной продукции во многом определяет и качество сооружений, устройств и оборудования, в которых эта продукция используется. Поэтому главным критерием при производстве кабельных изделий выступает их качество. Сведение выхода брака к минимуму достигается посредством совершенствования технологии контроля основных параметров изделия в процессе производства и автоматизацией технологических процессов.

В процессе изготовления контролируются различные конструктивно-технологические параметры кабельного изделия, часто связанные друг с другом: геометрические, электрические, механические. К числу основных параметров, контролируемых непрерывно по всей длине кабельного изделия, относятся диаметр токопроводящей жилы, диаметр изолированной жилы, толщина наложенной изоляции, эксцентricность токопроводящей жилы относительно изоляционной оболочки кабеля, погонная емкость кабельного изделия, скорость движения и общая длина изделия, наличие локальных дефектов изоляции, снижающих электрическую прочность изделия.

Для проводов, изолированных жил, кабелей круглого сечения одними из наиболее важных конструктивных параметров являются наружный диаметр, овальность и эксцентricность. Выход за допуски геометрических параметров кабельного изделия влечет за собой и изменение его электрических характеристик. Контроль геометрических параметров позволяет так же снизить расход дорогостоящего сырья и материалов. Измерение геометрических параметров кабеля должно происходить в режиме реального времени непосредственно в технологическом процессе. Существующие системы контроля (главным образом зарубежные) диаметра и эксцентricности электрического кабеля не удовлетворяют требованиям современных российских потребителей по цене и по ряду эксплуатационных характеристик. Нами предложены и разработаны методы и средства контроля диаметра и эксцентricности кабеля [1],

представляющие интерес для отечественных потребителей по совокупности критериев: цена, точность измерения, удобство применения.

Для контроля геометрических параметров кабельных изделий малого диаметра (до 50 мм) разработан и реализован метод двухкоординатного оптического преобразования диаметра и овальности протяжённых изделий в расходящемся пучке, основанный на измерении поперечного размера тени, создаваемой кабелем,

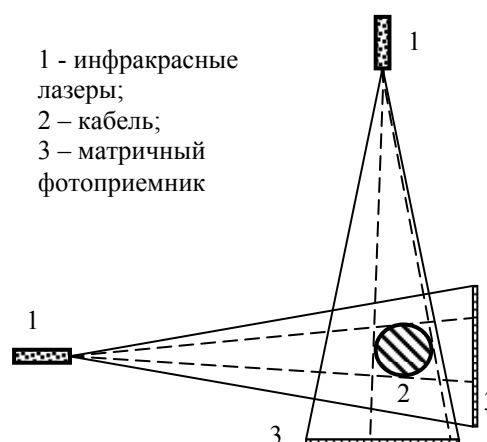


Рис. 1. Оптическая схема теневого метода в расходящемся пучке

проходящим через освещенную рабочую зону измерительной головки. Принцип измерения поясняет рис. 1.

Проходя через рабочую зону измерительной головки, световой поток точечного источника пересекает на своем пути контролируемый кабель и создает за кабелем тень. Ширина тени зависит от диаметра кабеля и положения кабеля вдоль измерительной оси. Значение диаметра кабеля в двух ортогональных направлениях определяется с использованием предложенного оптического двухкоординатного метода измерения диаметра в расходящемся лазерном пучке, который обладает целым рядом преимуществ, связанных с отсутствием в конструкции элементов линзовой и зеркальной оптики. Достижимая точность измерения таких приборов составляет доли микрометра и ограничена только дифракционными эффектами на границах тени и разрешающей способностью используемых многоэлементных приёмников.

Для контроля геометрических параметров кабельных изделий большого диаметра (свыше 20 мм) разработан и реализован метод

двухкоординатного проекционного оптического преобразования диаметра и овальности, основанный на измерении многоэлементным линейным фотоприемником поперечного размера изображения кабельного изделия, получаемого с помощью объектива. Для создания высокой контрастности изображения применена тыльная подсветка измеряемого объекта линейкой светодиодов. Двухкоординатное измерение диаметра обеспечивается наличием двух одинаковых измерительных систем, измерительные оси которых ортогональны. Применение двухкоординатной проекционной оптической измерительной схемы позволяет бесконтактно в режиме реального времени контролировать диаметр и овальность протяжённых изделий на разных этапах их производства непосредственно на технологической линии. Измерительные системы данного типа обеспечивают измерение диаметра до 200 мм с погрешностью не более 25 мкм.

На основе предложенных оптических методов контроля внешней оболочки электрического кабеля совместно с сотрудниками фирмы ООО "ЭРМИС+", Россия, г. Томск разработаны и поставлены для эксплуатации на многие заводы РФ, ближнего и дальнего зарубежья приборы для технологического контроля диаметра кабельных изделий в процессе их производства (табл. 1).

Таблица 1

Модель измерителя	Цикада-1.7	Цикада-2.72	Цикада-3.8	Цикада-3.72	Цикада-4.71
Диапазон измерения диаметра (мм)	0.1...5	0.3...10	4...60	4...60	20...120
Абсолютная погрешность измерения (мкм)	1	10	40	40	60
Метод измерения	двухкоординатный теневой в расходящемся световом пучке		двухкоординатный проекционный		

Задача измерения эксцентricности токоведущей жилы относительно центра изоляционного материала актуальна при производстве различной кабельной продукции. Этот параметр особенно критичен для высокочастотных проводов связи поскольку непосредственно определяет их технические и эксплуатационные характеристики (частотные свойства, пропускающую способность), а следовательно отражается на конечном качестве и цене готового изделия. Непрерывный контроль эксцентricности позволяет также снижать расход

дорогостоящих изоляционных материалов (ПВХ, резина, полиамид и др. пластикаты) при производстве сигнальных и силовых проводов и кабелей. Измерение эксцентricности осуществляется непосредственно после экструзии. Ввиду высокой температуры оболочки кабеля и незавершенности на данной стадии процесса ее затвердевания, не могут быть использованы контактные методы измерений и эффективные способы центрирования оболочки кабеля относительно продольной оси первичного измерительного преобразователя.

Наиболее эффективным методом контроля эксцентricности является индуктивно-оптический. Сущность этого метода измерения эксцентricности заключается в измерениях наружного диаметра и местоположения оболочки кабеля с использованием оптического преобразователя, местоположения электропроводящей жилы кабеля с использованием трансформаторного преобразователя и определении эксцентricности жилы кабеля на основе совместной обработки информации о местоположении оболочки и жилы кабеля.

Индуктивно-оптический метод измерения эксцентricности реализован в разработках лидеров кабельного приборостроения: "Sikora Industrieelektronik" (Германия), "Beta Instr Co" (Великобритания), "Zumbach Electronic Automatic" (Швейцария) [2, 3]. Высокие метрологические параметры реализующих данный метод приборов достигаются за счет использования достаточно сложных конструктивных и схемных решений. Препятствием для использования приборов зарубежных фирм на отечественных кабельных предприятиях являются высокая стоимость аппаратуры и повышенные требования к условиям ее применения в технологическом потоке изготовления кабеля.

Совместно с сотрудниками фирмы "ЭРМИС+" нами разработан усовершенствованный вариант индуктивно-оптического метода, который реализован в измерителе диаметра оболочки и эксцентricности жилы кабеля ВЕКТОР-2.1 [4]. Эта разработка в настоящее время готовится к серийному выпуску и должна заинтересовать отечественных потребителей по совокупности критериев: цена, точность измерения, удобство применения.

На рис. 2 схематически показана конструкция используемого индуктивно-оптического преобразователя, который обладает линейной функцией преобразования поперечного смещения проводника в электрический сигнал, что позволяет отказаться от электрических приводов в автоматическом режиме центрирующих блок датчиков относительно измеряемого объекта. В приборе использована описанная ранее двухкоординатная оптическая система с

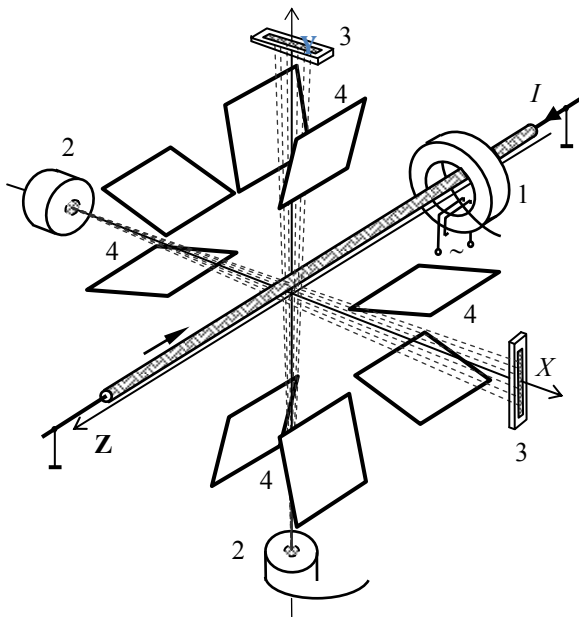


Рис. 2. Конструкция индуктивно-оптического преобразователя: 1 – индуктор; 2 – лазеры; 3 – матричные фотоприемники; 4 – обмотки

расходящимся лазерным пучком. Использование оригинальных подходов в реализации индуктивно-оптического метода измерения позволило конструктивно скомпоновать оптические и индуктивные преобразователи в единый, компактный, неподвижный, разъёмный измерительный индуктивно-оптический моноблок, достичь высоких метрологических параметров измерителя за счет выбора оптимальных конструкции и геометрических параметров трансформаторного измерительного преобразователя без применения механического привода и усложнения электронной схемы [5, 6].

Измерение скорости движения и длины кабельных изделий чаще всего осуществляется с использованием контактного метода, основанного на преобразовании прямолинейного движения изделия во вращательное движение мерного колеса, а также бесконтактного оптического метода на основе эффекта Доплера [7]. Для измерения длины и скорости движения каротажного кабеля с оболочкой из стальных жил целесообразно использование метода магнитных меток [8]. Этот метод реализован нами.

Сущность метода измерения длины протяженных ферромагнитных изделий с использованием магнитных меток (метода магнитных меток) заключается в нанесении на движущееся изделие импульсным электромагнитом магнитных меток, считывании этих меток расположенным на фиксированном расстоянии от электромагнита магнитным преобразователем, нанесении каждой последующей метки в момент считывания предыдущей, подсчете числа считанных

магнитным преобразователем магнитных меток и определении длины изделия путем умножения числа посчитанных магнитных меток на базовое расстояние.

Этот метод реализован нами в совместной разработке с ООО «ЭРМИС+» – измерителе длины и скорости ДЕЛЬТА-4.1. Предложенные в измерителе конструктивные и схемные решения, оптимальный выбор режимов работы магнитных преобразователей, а также оригинальный алгоритм преобразования сигналов измерительной информации [9] позволили обеспечить высокую точность измерения при малой длине мерной базы и большом диапазоне поперечных смещений изделия и изменений скорости движения. Основные технические характеристики измерителя ДЕЛЬТА-4.1: диапазон измерений скорости изделия (0÷150) м/мин; пределы допускаемой погрешности измерений длины изделия ±1%; пределы допускаемой погрешности

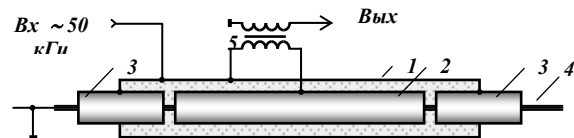


Рис. 3. Конструкция электроемкостного измерительного преобразователя:

- 1 – наружный электрод; 2 – измерительный электрод; 3 – дополнительные электроды; 4 – кабель; 5 – трансформатор тока

измерений скорости ±3%; допустимый зазор между элементами измерителя и изделием – 10 мм.

Для ряда кабельных изделий, таких как коаксиальные, телефонные, высокочастотные и LAN-кабели одной из основных характеристик является погонная электрическая емкость кабеля, определяющая его волновые характеристики. Для измерения погонной электрической емкости кабеля непосредственно в процессе изготовления используется электрический метод контроля, основанный на измерении емкостного тока, протекающего между токоведущим проводником изолированной жилы и трубчатым электродом, помещенным в охлаждающую ванну экструзионной линии. На рис. 3 показана конструкция электроемкостного измерительного преобразователя измерителя "Волна-1.2, предназначенного для измерения погонной электрической емкости кабеля непосредственно в процессе его изготовления.

Трубчатый электрод электроемкостного измерительного преобразователя представляет собой сложную составную конструкцию, состоящую из наружного, измерительного и дополнительных электродов. Конструкция емкостного преобразователя и используемый алгоритм преобразования сигнала измерительной информации обеспечивают независимость

результата измерения от основных влияющих параметров: скорости жилы, ее положения внутри электрода, изменения температуры и электропроводности охлаждающей воды.

Основные технические характеристики измерителя ВОЛНА-1.2: проходной диаметр электрода – 20 мм; диаметр контролируемой жилы по изоляции – до 10 мм; пределы допускаемой погрешности измерений емкости $\pm (0,05 \times C + 2)$ пФ.

При производстве кабельных изделий необходимо контролировать целостность их изоляции, оболочки или защитного покрова. Контроль на технологической линии осуществляется электроискровым методом. При движении изделия по экструзионной линии к поверхности его изоляции прикладывается высокое напряжение посредством специальных электродов, а токопроводящая жила или броня заземляется. Уровни испытательных напряжений выбираются таким образом, чтобы не повредить качественную изоляцию. Форма, частота и уровень испытательного напряжения регламентируются нормативными документами на кабельное изделие, а также национальными и международными стандартами [10, 11].

При контроле качества изоляции применяются испытания постоянным, импульсным, синусоидальным напряжением промышленной частоты, а также синусоидальным напряжением звуковой частоты (сотни, тысячи герц). В этой связи принято разделять аппараты (АСИ -

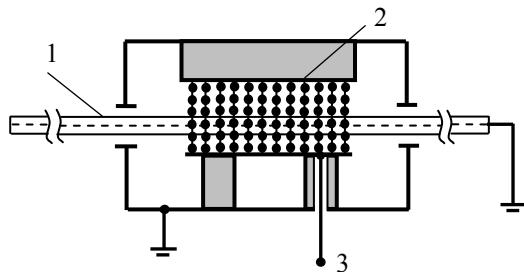


Рис. 4. Схема электроискрового контроля изоляции кабельных изделий: 1 – кабель; 2 – электрод; 3 – испытательное напряжение

аппараты сухих испытаний) по типам: АСИП, ЗАСИ, ИАСИ. На рис. 4 приведена схема электроискрового контроля изоляции кабельных изделий.

Высоковольтные испытатели с напряжением промышленной частоты (АСИП) применяются на среднескоростных линиях (до 10 м/с). Основные достоинства этих испытателей: безопасность и малая требуемая мощность, в связи с практически отсутствующими емкостными токами через изоляцию, что позволяет строить испытатели с высоким значением испытательного напряжения (до 50 кВ амплитудного значения). Также достоинством этого вида контроля является то,

что в этом случае для изоляции большинства кабелей испытательное напряжение по форме и частоте совпадает с рабочим.

Недостатком приборов контроля с испытательным напряжением промышленной частоты являются их большие размеры и масса, что затрудняет установку этих приборов в линию. Масса испытателя может достигать 100 кг, а протяженность вдоль линии 1 м.

Высоковольтные испытатели с напряжением звуковой частоты (ЗАСИ) применяются на высокоскоростных линиях (до 50 м/с). Основные достоинства этих испытателей: высокая скорость контроля и малые габариты электродного узла, что позволяет встраивать их практически в любую линию. В качестве недостатка таких приборов необходимо отметить значительный емкостной ток через контролируемую изоляцию, что практически исключает возможность построения испытателей на большие испытательные напряжения. Как правило, испытательное напряжение не превышает 30 кВ.

Высоковольтные испытатели с импульсным напряжением (ИАСИ) применяется на низкоскоростных линиях (до 5 м/с). Основные достоинства этих испытателей: возможность контролировать изоляцию с низким сопротивлением, например резиновую, сопротивление которой может не превышать 1 МОм на участке электродного узла (не более 10 МОм/м). Это возможно потому, что в таких приборах существует сочетание высокой импульсной и малой средней мощностей. Импульсная мощность в разы выше, а средняя в несколько раз меньше, чем в аппаратах с синусоидальным испытательным напряжением за счет скважности импульсов $Q = 10 - 100$. Также существенным достоинством является возможность проводить контроль на больших напряжениях, до 40 кВ в амплитуде. Недостатком таких приборов является низкая скорость контроля, так как частота повторения импульсов составляет, $f = (50 - 300)$ Гц. При этом длина электродного узла в импульсных аппаратах значительно меньше, чем у аппаратов с напряжением промышленной частоты. Малая длина электродного узла диктуется требованиями к малой электрической емкости контролируемой изоляции, приходящийся на электродный узел. Низкая скорость контроля не является существенным недостатком для этого типа приборов, так как ими контролируется изоляция, как правило, силовых кабелей, а скорость линий их изготавливающих низкая в связи со значительными размерами и высокой жесткостью силовых кабелей.

Приборы контроля изоляции с постоянным испытательным напряжением широко распространены за рубежом (Евросоюз, США). В Советском Союзе, а затем и в РФ такой тип

приборов при контроле на технологической линии не использовался, и не используются до сих пор. Это ограничение установлено ГОСТ 2990. Технические условия на некоторые кабели позволяют проводить водные испытания или сухие испытания уже готового кабеля в бухте постоянным напряжением.

Достоинством приборов с постоянным испытательным напряжением является возможность работать на высокоскоростных линиях (до 50 м/с), а также низкая требуемая мощность, в связи с малыми емкостными токами. Однако применение такого вида контролирующего напряжения ограничено в связи с тем, что распределение напряжения в изоляции при испытании постоянным напряжением определяется проводимостью, а при испытании переменным напряжением – диэлектрической постоянной, то есть испытания переменным и постоянным напряжением не однозначны. В случае последовательного соединения элементов изоляции может возникнуть опасность повышения напряжения на части изоляции с малой проводимостью и ухудшению тем самым параметров контроля.

В каждом конкретном случае тип испытательного напряжения регламентируется техническими условиями на изготавливаемый кабель. Технические условия в свою очередь основываются на требованиях ГОСТ 2990. Нами совместно с ООО «НПО Редвилл», г. Томск разработаны несколько моделей высоковольтных испытателей изоляции [12]. Основные характеристики испытателей приведены в табл. 2.

Таблица 2

Наименование	ЗАСИ-20	ЗАСИ-30	ИАСИ-30
Диапазон испытательного напряжения, кВ	0,8 ÷ 22	1 ÷ 30	1 ÷ 30
Частота испытат. напряжения, кГц	0,5÷1,5	0,5÷1,5	200
Макс. емкость нагрузки, пФ	300	300	200
Мин. активное сопротивление нагрузки, МОм	10	10	3
Макс. скорость контроля, м/с	30	30	10

Отличительными особенностями испытателей от зарубежных аналогов является более широкий



Рис. 5. Высоковольтный испытатель «ЗАСИ-30» и электродный узел «ЭУ-60/150», ООО «НПО Редвилл», г. Томск

диапазон испытательных напряжений, меньший ток короткого замыкания, что определяет электробезопасность, и меньшая стоимость. На рис. 5 приведены фотографии одной из моделей высоковольтного испытателя.

В настоящее время коллектив разработчиков работает над следующими научными задачами:

- изучение влияния формы и частоты испытательного напряжения на достоверность контроля;
- создание физических образцов дефектов;
- определение границ контроля для различных видов дефектов, выявляемых высоковольтными испытаниями непосредственно на технологической линии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фёдоров Е.М., Гольдштейн А.Е., Редько В.В. Методы и приборы оптического бесконтактного двухкоординатного контроля диаметра и овальности электрических кабелей в процессе их производства. – Ползуновский вестник, 2010, № 2, с. 141-149.
2. Web-site "Sikora Industrieelektronik". URL: <http://www.sikora.com> (дата обращения: 27.05.2011).
3. Web-site "Zumbach Electronic Automatic". URL: <http://www.zumbach.com> (дата обращения: 27.05.2011).
4. Web-сайт ООО «ЭРМИС+». URL: <http://www.ermis.tomsk.ru/catalog/delta/index.htm> (дата обращения: 27.05.2011).
5. Pat. WO 03085354. EC G01B11/10B. Contactless system for measuring centricity and

diameter / Zumbach Electronic AG (CH).

Publ. 16.10.2003, esp@cenet database. – 18 p.: П.

6. Гольдштейн А.Е., Фёдоров Е.М., Свендровский А.Р., Редько В.В. Измеритель диаметра и эксцентricности электрического кабеля на основе индуктивнооптического метода. // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. - № 2. – с. 130–134.

7. Каминский Ю.Д., Проскурнев С.Ю., Заманский В.И. Лазерные доплеровские измерители скорости и длины кабелей и проволоки. URL: <http://www.ruscable.ru/doc/analytic/statya-154.html> (дата обращения: 27.05.2011).

8. Кривко Н.Н. Аппаратура геофизических исследований скважин. – М.: Недра, 1991. – 384 с.

9. Гольдштейн А.Е., Уразбеков Е.И. Отстройка от влияния неравномерности скорости движения при измерении длины ферромагнитных изделий методом магнитных меток. – Дефектоскопия, 2008, № 11, с. 69 – 75.

10. IEC 62230:2006. Electric cables – Spark-test method. Typeset and printed by the IEC Central Office GENEVA, SWITZERLAND. 2006. – 48 p.

11. Comparison of impulse and 3 kilohertz wave spark testing. Henry Clinton. 16th International Wire and Cable Symposium held on Nov. 29th, 1967, in Atlantic City, N.J.

12. В.В. Редько, Л.Б. Бурцева, Л.А. Редько. Изоляция кабельных изделий как объект электроискрового технологического контроля. Журнал «Известия Томского политехнического университета». 2010. Т. 317. № 4 с. 111–114

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ И ТЕРАПЕВТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Сырямкин В.И., Буреев А.Ш., Осипов А.В., Жданов Д.С.

Томский государственный университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: D_S_Zhdanov@mail.ru

В статье описываются разработанные авторским коллективом неинвазивные диагностические системы, терапевтическая система контроля проведения процедуры инфузии и система телемедицины, в которую интегрируются все вышеперечисленные технические решения.

В настоящее время остро стоит проблема разработки программного и аппаратного обеспечения, которое бы в короткие сроки позволило провести диагностику состояния органов человека и в разы уменьшило вероятность объективной ошибки со стороны практикующего специалиста. Такие ошибки могут возникать в случае недостаточной компетенции узкого специалиста в своей области. Аппаратное и программное обеспечение позволяет поставить более верный диагноз и сократить сроки принятия решений о дальнейшей процедуре лечения пациента, обратившегося на прием к врачу узкой специализации. Также необходимо оптимизировать терапевтические процедуры, которые проводятся в стационарах как мировых, так и отечественных медицинских учреждениях. Авторским коллективом был создан ряд устройств, позволяющих проводить быструю неинвазивную диагностику состояния таких органов и систем как:

- 1) поверхности кожи (дерматология);
- 2) поверхности шейки матки (гинекология);
- 3) ушной и ротовой полости (отоларингология);
- 4) состояния сердечно - сосудистой системы по капиллярам эпонихия пальцев рук человека.

Устройства представляют собой программно – аппаратные комплексы, позволяющие считывать цветные телевизионные изображения поверхностей исследуемых органов и, с помощью специализированного программного обеспечения, хранящие, передающие и обрабатывающие полученные изображения. В результате обработки снимков поверхностей исследуемых органов автоматизированная система, представляющая собой программную часть каждого из устройств, выдает заключение о наличии, либо же отсутствии патологии исследуемых органов и систем. Функциональная схема разработанных неинвазивных диагностических систем представлена на рисунке 1.

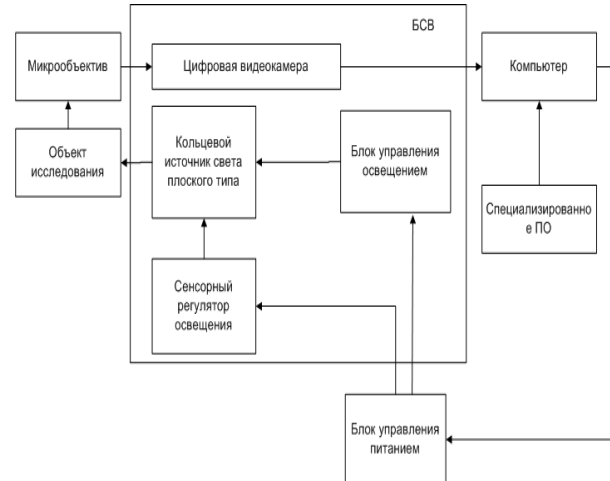


Рис. 1. Функциональная схема неинвазивных диагностических систем

Как видно из рис. 1 аппаратная часть неинвазивных диагностических систем состоит из блока считывания изображения (содержит в своем составе цифровую видеокамеру, блок подсветки считываемой области, регулятор освещения) и блока управления питанием каждого из устройств. Специализированное программное обеспечение (ПО) неинвазивных диагностических систем обеспечивает прием цветных телевизионных изображений с аппаратной части системы в базу данных ПО, которая хранится на персональном компьютере в зашифрованном виде. Обработка цветных телевизионных изображений происходит на основе быстродействующих прецизионных алгоритмов распознавания патологий органов человека, разработанных авторским коллективом.

Опишем эти алгоритмы в обобщенном виде.

В общем случае происходит сравнение получаемого в ходе исследования изображения (текущего изображения (ТИ)) с эталонным изображением (ЭИ), хранящимся в базе данных программной части диагностической системы. Сравнение происходит после описания пространства признаков на ЭИ и ТИ. В результате описания пространства признаков строятся взаимокорреляционные функции, описываемые с помощью следующих выражений:

$$J_R(\xi, \eta) = K_{II} \int_s F_1^C(x_1, y_1) F_2^R(x_2, y_2) dx dy;$$

$$J_B(\xi, \eta) = K_{II} \int_s F_1^C(x_1, y_1) F_2^B(x_2, y_2) dx dy;$$

$$J_G(\xi, \eta) = K_{II} \int_s F_1^C(x_1, y_1) F_2^G(x_2, y_2) dx dy,$$

где JR, JG, JB – взаимнокорреляционные функции, которые характеризуют красные, зеленые и синие цвета $F_1^c(x_1, y_1)$ – функция, описывающая цветное телевизионное изображение (система координат X1, O1, Y1);

$$F_2^R(x_2, y_2) \quad F_2^G(x_2, y_2) \quad F_2^B(x_2, y_2)$$

– функции, описывающие текущее изображение, вычисляя соответственно значения красной R, зеленой G и синей B цветовых компонент; K – коэффициент пропорциональности.

Геометрические характеристики исследуемых поверхностей определяются следующими формулами:

$$K_\phi = \frac{S_{CЭ}}{P^2}; \quad X_c = \frac{\sum_{i=1}^{N_k} \Delta M_{KX}}{S_{CЭ}}; \quad Y_c = \frac{\sum_{i=1}^{N_k} \Delta M_{KY}}{S};$$

где X_c, Y_c – координаты центра структурного элемента на исследуемом изображении

$\Delta M_{KX}, \Delta M_{KY}$ – импульсные моменты по направлению соответствующих осей;

N_k – количество точек (пикселей) в исследуемом контуре;

i – количество контуров;

$S_{CЭ}$ – Область зоны изображения, структурный элемент, связанный с контуром;

КФ – коэффициент формы;

P – периметр контура.

Затем происходит сравнение ЭИ и ТИ:

$$\hat{v} = \arg \text{extr}R(F_1, F_2(v))$$

Программное обеспечение, входящее в состав неинвазивных оптико-телевизионных диагностических систем, разработанных авторским коллективом, помимо распознавания патологий исследуемых органов человека позволяет также:

1) вести электронные истории болезни пациентов, обратившихся на прием;

2) формировать электронную базу данных получаемых во время исследований изображений;

3) генерировать отчетную информацию, необходимую для работы врача-специалиста;

4) интегрировать неинвазивные диагностические системы в Российские и мировые телемедицинские сети [1-9].

Новизна разработанных авторским коллективом неинвазивных диагностических систем заключается в:

1) Совместном использовании на медицинском инструменте миниатюрных цветных телевизионных камер и источников света холодного свечения, совместимых по спектру.

2) Структурной реализацией приборов, позволяющая комплектовать медицинские системы персональным компьютером или ноутбуком, подключаемым к информационной сети клиники.

3) Специализированном диагностическом программном обеспечении, позволяющем в автоматическом режиме определять гинекологические, урологические, отоларингологические и патологии кожных покровов.

4) Возможности интеграции программно – аппаратного комплекса в состав телемедицинских сетей.

5) Доступности приборов для учреждений здравоохранения (невысокая стоимость, небольшие массогабаритные характеристики).

На рисунке 2 представлен внешний вид макетного образца универсальной диагностической системы, разработанной авторским коллективом.



Рис. 2. Общий вид универсальной неинвазивной диагностической системы

Помимо неинвазивных диагностических систем всем учреждениям здравоохранения необходима терапевтическая система, позволяющая контролировать процесс инфузии (введения) жидкого лекарственного средства в организм пациента в стационарах медицинских учреждений. В настоящее время существуют лишь системы, позволяющие задавать объем вводимого лекарственного препарата и время его введения, но не следящие за ходом самой процедуры инфузии. Авторским коллективом была разработана интеллектуальная телекоммуникационная автоматическая система контроля состояния капельниц (ИТАСКСК), выполняющая следующие функции:

1. контроль процедуры инфузии: передача информации на пульт управления и пейджер медсестры;

2. фиксация номенклатуры вводимого лекарственного средства;

3. считывание штрих-кода вводимого лекарственного препарата;

4. контроль скорости подачи лекарственного средства;

5. контроль объема введенного раствора;
6. объективный контроль состояния пациента.

При возникновении внештатной ситуации (такой как: выпадение иглы из вены пациента, закупорка гравитационного тракта, ухудшение состояния пациента), ИТАСКСК прекращает процедуру инфузии и сигнализирует дежурной медсестре о возникновении проблемы.

ИТАСКСК контролирует следующие параметры:

- 1) Тип лекарственного средства.
- 2) Скорость подачи лекарственного средства.
- 3) Объем вводимого лекарственного средства.
- 4) Пульс пациента.

От существующих аналогов (в большинстве своем – шприцевые насосы-инфузоматы ИТАСКСК отличается тем, что:

- 1) имеется обратная связь «система-оператор»;
- 2) осуществляет регуляцию скорости потока жидкого лекарственного препарата;
- 3) имеет возможность оповещения о нештатных ситуациях;
- 4) осуществляет прекращение подачи лекарственного препарата при нештатных ситуациях;
- 5) производит фиксацию номенклатуры вводимого лекарственного препарата;
- 6) производит объективный контроль состояния пациента;
- 7) имеет возможность управления до 60 капельницами.

На рисунке 3 представлен внешний вид разработанной терапевтической системы контроля за проведением процедуры инфузии жидкого лекарственного средства [1-11].



Рис. 3 .Внешний вид ИТАСКСК

Все неинвазивные диагностические системы и ИТАСКСК интегрируются в единую телемедицинскую систему, разработанную авторским коллективом, которая применяется для:

1. диагностики и консультации на расстоянии, прежде всего между врачом-консультантом и другим медицинским работником;

2. проведения лечебных мероприятий на расстоянии (психотерапия, фрагменты хирургических вмешательств с помощью телеманипуляторов);

3. Дистанционного обучения (студенты, аспиранты, переподготовка в реальном времени).

ЛИТЕРАТУРА

1. Siryamkin V.I., Bureyev A.Sh., Zhdanov D.S. «Software engineering of intellectual optical-television » 9th International Conference «Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies» (PRIA-9-2008): Conference Proceedings. Vol. 2. – Nizhni Novgorod, 2008. – 404 p. – P. 189-192.;

2. Siryamkin V.I., Bureyev A.Sh., Zhdanov D.S. «Automatic work-station development for a strictly specialized doctor with an integrated MOTDs for internals condition diagnosing» 9th International Conference «Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies» (PRIA-9-2008): Conference Proceedings. Vol. 2. – Nizhni Novgorod, 2008. – 404 p. – P. 186-188.

3. Сырямкин В. И., Буреев А. Ш., Жданов Д. С., Работа врачей - узких специалистов в системе телемедицины, журнал «Телекоммуникации» №11, Москва, 2009, с. 14-18

4. Сырямкин В. И., Жданов Д. С., Обработка цветных изображений в оптико-телевизионных системах распознавания, навигации и диагностики, журнал «Телекоммуникации» №1, Москва, 2010, с. 30.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2009615927 «АРМ для медицинских учреждений дерматологического профиля»

6. Авторы: Жданов Дмитрий Сергеевич, Буреев Артем Шамильевич, Сырямкин Владимир Иванович, Осипов Артем Владимирович (RU)

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2009615928 «АРМ для медицинских учреждений ангиологического профиля»

8. Авторы: Жданов Дмитрий Сергеевич, Буреев Артем Шамильевич, Сырямкин Владимир Иванович, Осипов Артем Владимирович (RU)

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2009615929 «АРМ для медицинских учреждений отоларингологического профиля»

10. Авторы: Жданов Дмитрий Сергеевич, Буреев Артем Шамильевич, Сырямкин Владимир Иванович, Осипов Артем Владимирович (RU).

11. Бубенчиков М. А., Газиева Е. Э., Гафуров А. О., Глушков Г. С., Жданов Д. С., Саньков Д. В., Сырямкин В. И., Шидловский С. В., Юрченко А. В. «Современные методы исследования материалов и нанотехнологий, Учебное пособие (лабораторный практикум), 366 стр.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПЫТНЫХ СИСТЕМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ОКСИДА ГАДОЛИНИЯ В СНАРЯЖЕННОМ ТВЭГЕ

Карлов Ю.К., Кулешов В.К.

ОАО «Новосибирский завод химконцентратов», 630110, г. Новосибирск, ул. Б.

Хмельницкого, 94

E-mail:kuk@ncsr.ru

Введение

В настоящее время атомная промышленность переживает сложный период, когда необходимо инвестировать большие интеллектуальные и материальные ресурсы в развитие безопасных, экологически чистых технологий производства и эксплуатации ядерного топлива. Это тем более сложно, что нужно остаться конкурентоспособными и не потерять рынок. Поэтому ведётся непрерывная работа по совершенствованию качества ядерного топлива всеми ведущими его поставщиками. Одним из перспективных направлений в этой области являются работы по широкому применению в составе топливной таблетки оксида гадолия (Gd_2O_3), используя его свойства к резонансному захвату тепловых нейтронов. ТВЭЛы с таблетками, содержащими оксид гадолия, располагаются в активной зоне реактора наряду с обычными, их количество может быть различно в зависимости от конструкции тепловыделяющей кассеты (ТВС). Кроме того, производится профилирование ТВЭЛ по высоте таблетками разного обогащения по гадолию. Присутствие в активной зоне реактора таких ТВЭЛов положительно сказывается на его работе. Прежде всего происходит равномерное выгорание ядерного топлива, несмотря на неравномерность нейтронного потока, следовательно, более равномерное тепловыделение по периметру и высоте активной зоны. Это во многом обеспечивает безопасность работы реактора, более полное выгорание ядерного топлива. В связи с этим улучшаются технико-экономические показатели работы новых ТВС.

Применяемое обогащение по гадолию варьируется в диапазоне от 0 до 8 % массовых.

Очень важно, чтобы при снаряжении ТВЭЛ таблетки с нужным обогащением заняли правильное положение и не было нештатных таблеток с другим обогащением внутри топливного столба.

Этим обоснована необходимость контроля обогащения оксидом гадолия топливных таблеток в снаряжённом ТВЭЛе. Это можно сделать только с использованием методов неразрушающего контроля. Подробный обзор возможных методов неразрушающего контроля для реализации данной цели дан в работе [1]. Наиболее перспективными оказались магнитный и электромагнитный методы, которые в основе

опираются на то, что магнитные свойства и электропроводность гадолия значительно выше нежели у двуокиси урана, являющейся основным компонентом топливной таблетки. В основе исследуемых опытных систем контроля оксида гадолия заложен магнитный метод. Электромагнитная методика контроля оксида гадолия реализована на предприятии ENUSA в Испании при производстве ТВЭЛов для реакторов типа PWR [2].

Исходные данные и методика исследований

Технические требования по контролю содержания оксида гадолия в топливных таблетках в ТВЭЛх для реактора ВВЭР-1000 даны в технических условиях, где определена погрешность определения содержания оксида гадолия в таблетке снаряжённого ТВЭЛ не хуже $\pm 0,4\%$ абсолютных с доверительной вероятностью 0,95. Это жесткое требование определяется тем, что предполагаемый ряд используемых обогащений гадолия будет весьма плотным, в настоящее время применяются обогащения 8%, 5% и предполагается 3,35%. Конструкция ТВЭЛ представляет собой циркониевую трубку диаметром 9,1 мм, длиной от 3,8 м до 3,9 м, заполненную топливными таблетками. Нижняя и верхняя заглушка приварены контактно-стыковой сваркой, причём если к нижней заглушке таблетка установлена вплотную, то к верхней заглушке подходит пружинный фиксатор, который упирается в последнюю таблетку, образуя тем самым компенсационный объём, который перед сваркой заполняют гелием давлением 18–23 кг/см². Система неразрушающего контроля разработки института ВНИИНМ «АНФЕР» состоит из двухканального электромагнитного дефектоскопа-контроллера собственной разработки, проходных первичных преобразователей, механизма сканирования ТВЭЛ, устройств загрузки и выгрузки, контроллера управления приводом, магнитной системы и встроенных настроечных образцов. Система неразрушающего контроля Томского НИИ интроскопии имеет одноканальный измерительный тракт, состоящий из блока измерительных преобразователей, стандартного электромагнитного дефектоскопа ELOTEST N320 и магнитной системы. Данная система не имеет собственного механизма загрузки, сканирования и выгрузки ТВЭЛ. Для проведения исследований были изготовлены специальные стандартные

образцы, аттестованные метрологической службой предприятия. Они представляют собой твэл, изготовленный по штатной технологии, заполненный набором топливных таблеток в определённой последовательности. Обогащение таблеток по U^{235} и оксиду гадолиния заранее определено соответствующими методами.

Испытания измерительной системы НИИ интроскопии

При испытаниях использовались стандартные образцы предприятия содержания гадолиния (далее – СОП), предназначенные для калибровки установки «Анфер-1». СОП (зав. №№ У453, У455, У456) изготовлены и аттестованы цехом 24 ОАО «НЗХК». Схема СОП представлена на рис.1 Сведения по заполнению зон таблетками с разным содержанием оксида гадолиния – в табл. 1.

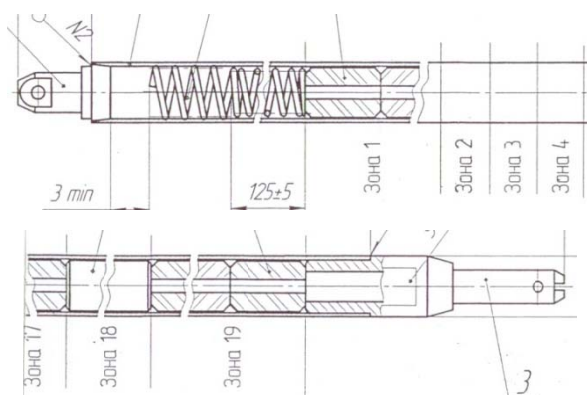


Рис.1 Схема СОП

Номинальное значение обогащения по урану в таблетках СОП – 3,0%. Массовая доля оксида гадолиния и железа в таблетках каждой зоны СОП в соответствии с паспортом 500.976.00.003 ПС приведена в таблице 1

Содержание никеля во всех таблетках СОП не превышает 1/3 содержания железа и магнитная проницаемость никеля в несколько раз меньше магнитной проницаемости железа, поэтому влияние никеля на результаты измерений в данном случае можно не учитывать.

Таблица 1

Зоны по заполнению таблетками с разным содержанием оксида гадолиния

№ зоны	Содержание Gd_2O_3 , %	Количество таблеток
1	5	10
2	0	5
3	4	5
4	6	5
5	5	5
6	0	1
7	5	5
8	3,5	1
9	5	5
10	4	1
11	5	5

12	6	1
13	5	5
14	7	1
15	5	5
16	8	1
17	5	5
18	Удлинитель – цилиндр из диэлектрика	
19	5	5

При испытаниях измерительной системы под управлением персонального компьютера использовалось программное обеспечение EddyClient, входящее в состав измерительной системы. С помощью программы реализован прием информации с вихретокового дефектоскопа при его работе в режиме «комплексной плоскости». Измерения проводились в статическом режиме. Координаты точек комплексной плоскости, соответствующие концам векторов электрического напряжения измерительных обмоток вихретоковых преобразователей, записывались по команде оператора на жесткий диск компьютера в файлы текстового формата.

Пример отображения результатов измерений на комплексной плоскости приведен на рисунке 2.

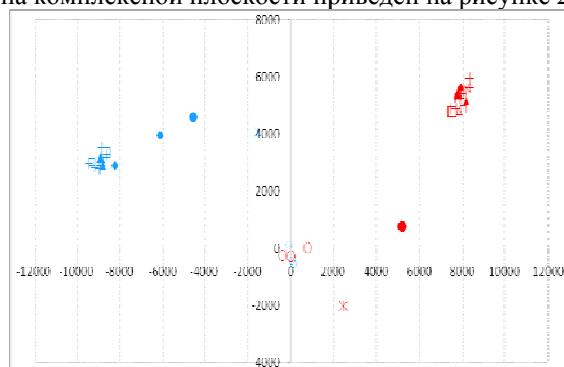


Рис. 2. Результаты измерений №1 по СОП У453

По горизонтальной оси отображается действительная часть электрического напряжения измерительных обмоток преобразователя в условных единицах, по вертикальной – мнимая. Величину сигналов, связанную с массовой долей оксида гадолиния Gd_2O_3 и ферромагнитных примесей, можно оценить по расстоянию от точки, соответствующей таблеткам без Gd_2O_3 (зона 2 СОП), до точки, соответствующей таблеткам с определенным содержанием Gd_2O_3 . Значения этих расстояний V в условных единицах приведены в таблицах и на графиках.

СОП У455 и У456 одинаковы как по содержанию Gd_2O_3 , так и по содержанию ферромагнитных примесей в таблетках соответствующих зон, а СОП У453 отличается от вышеуказанных СОП только содержанием железа в таблетках с пятипроцентным содержанием Gd_2O_3 (для У455 и У456 – 0,0105% Fe, для У453 – 0,034% Fe).

Измерения по СОП У453 и У455 проведены дважды, по СОП У456 – трижды.

Результаты измерений по СОП У453 представлены на рисунках 3,4.

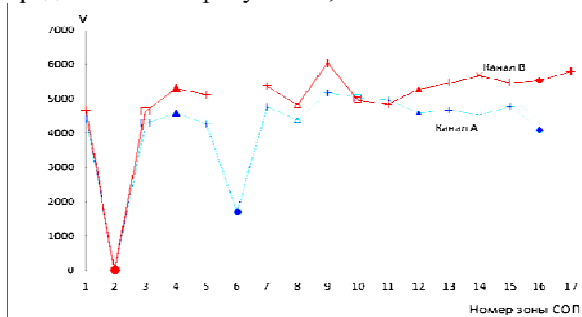


Рис.3. Результаты измерений №1 по СОП У453

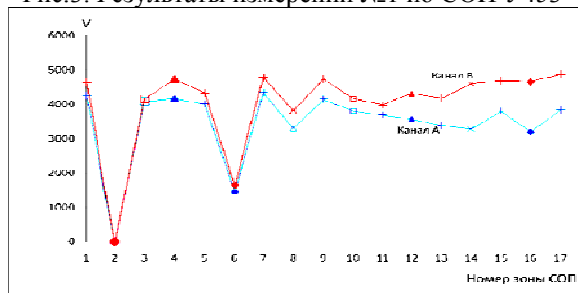


Рис.4. Результаты измерений №2 по СОП У453

В каждой из зон 1-5 содержится не менее пяти одинаковых по содержанию Gd_2O_3 таблеток. При первом и втором измерениях в преобразователе с магнитом полученные значения сигналов пропорциональны массовой доле Gd_2O_3 . Сигнал от таблеток с четырехпроцентным содержанием Gd_2O_3 меньше, а от таблеток с шестипроцентным содержанием – больше, чем сигнал от таблеток с пятипроцентным содержанием. Так как преобразователь без магнита дает аналогичные сигналы, этот результат можно считать следствием удачного для контроля сочетания содержаний Gd_2O_3 и железа в таблетках.

При измерениях наблюдается разброс величины сигнала в зонах с одинаковыми таблетками (с пятипроцентным содержанием Gd_2O_3), превышающий разность сигналов от таблеток, содержание Gd_2O_3 в которых отличается на один процент.

Перед измерениями по каждому СОП производилась балансировка преобразователей по пустой оболочке твэга, а после окончания измерений по СОП проводилось измерение той же пустой оболочки. Смещение точек, соответствующих сигналам от оболочки твэга, на 1900 условных единиц по одному каналу и на 1200 – по другому, также свидетельствует о большой временной нестабильности.

Результаты измерений по СОП У455 представлены на рисунках 5,6.

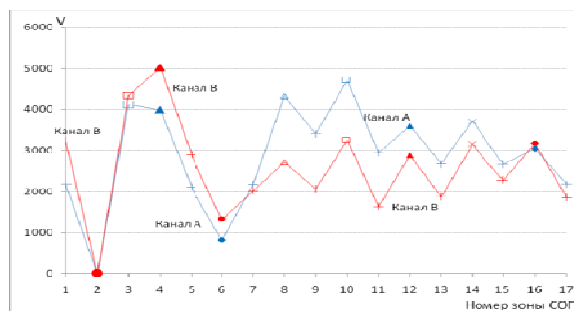


Рис.5. Результаты измерений №1 по СОП У455

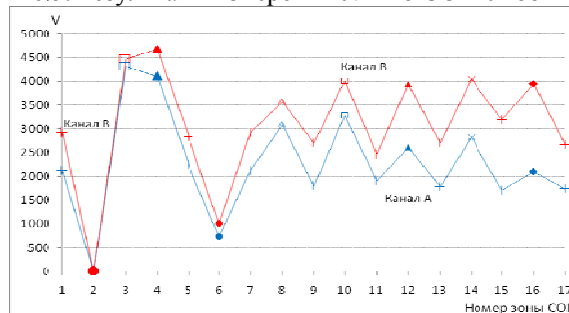


Рис.6. Результаты измерений №2 по СОП У455

В результатах измерений по зонам 1-5 СОП наблюдается изменение соотношения величины сигналов от зон с содержанием Gd_2O_3 4% и 6%. В преобразователе без магнита сигнал от таблеток с содержанием 4% превышает сигнал от таблеток с содержанием 6%, т.к. содержание железа в первых выше (0,045% и 0,026% соответственно). В преобразователе с магнитом, вследствие намагничивания железа, сигнал от таблеток с содержанием 4% Gd_2O_3 становится меньше сигнала от таблеток с 6%-ным содержанием. Но сигнал от таблеток с 5%-ным содержанием Gd_2O_3 и с содержанием железа 0,0105% меньше сигналов от таблеток 4% и 6%, как в канале без магнита, так и с магнитом. Это свидетельствует о недостаточной намагниченности железа.

При измерениях в зоне 6 (одиночная таблетка без гадолиния) по всем СОП сигналы существенно отличались от сигналов зоны 2 (пять таблеток без гадолиния). Это объясняется влиянием соседних таблеток из-за большой протяженности зоны контроля измерительных обмоток преобразователя. Длина измерительных обмоток – 10 мм. Влияние сказывается и в других зонах с одиночными таблетками.

Выводы

Напряженность постоянного магнитного поля в зоне контроля недостаточна для полного насыщения намагниченности ферромагнитных примесей, а также не доработана методика совместной обработки сигналов с первичных преобразователей, что не дает возможности отстройки от влияния ферромагнитных примесей на результаты контроля массовой доли оксида гадолиния.

Большая протяженность зоны контроля (в зону чувствительности измерительных обмоток

первичных преобразователей попадает более одной таблетки) приводит к влиянию соседних таблеток на результат контроля.

Дрейф показаний в процессе контроля превышает разницу сигналов от таблеток, отличающихся содержанием оксида гадолия на 1%.

Для доработки измерительной системы рекомендуется

- разработка первичных преобразователей с лучшей локальностью;
- уменьшение влияния временной (температурной) нестабильности;
- применение магнита с большей напряженностью постоянного магнитного поля в зоне контроля до 1200 кА/м с разработкой алгоритма совместной обработки сигналов от двух первичных преобразователей;
- доработка специализированного программного обеспечения дефектоскопа ELOTES N320, для обработки сигналов первичных преобразователей.

Испытания измерительной системы «АНФЕР» ВНИИИМ

Данная система оснащена механизмом сканирования блока первичных преобразователей, механизмом загрузки и выгрузки твэлов, работающих в автоматическом режиме, поэтому было возможно провести контроль не только стандартных образцов, но и штатных твэлов. Контроль проводился в течении нескольких дней.

Результаты следующие:

Контроль партии 536 00562 проверено 75 шт. Все изделия забракованы по таблетке, примыкающей к пружинному фиксатору.

Контроль партии 536 00561 проверено 85 шт. Все изделия забракованы по таблетке, примыкающей к пружинному фиксатору. Кроме того, в изделиях № 11, 40 и 55 сигнал обработан со сбоем и существенно отличался от типичного, а в изделии №13 имеется таблетка дающая показания 7,8% Gd, которая не примыкает к пружинному фиксатору.

Контроль партии 536 00653 проверено 42 шт. изделий. Все изделия забракованы по таблетке, примыкающей к пружинному фиксатору. Сбой 10 шт. На входе в измерительную головку обнаружена циркониевая стружка. Контроль остановлен. Проведена чистка измерительной головки и настройка положения удерживающих поворотных опор.

Контроль партии 536 00633 проверено 85 шт. изделий. Все изделия забракованы по таблетке, примыкающей к пружинному фиксатору. Сбой 2 шт.

Контроль партии 536 00664 проверено 8 шт. изделий. Все изделия забракованы по таблетке, примыкающей к пружинному фиксатору. Без сбоев.

Контроль партии 536 00663 проверено 85 шт. изделий. Все изделия забракованы по таблетке,

примыкающей к пружинному фиксатору. Без сбоев.

Всего было проконтролировано 6 партий твэлов с общим количеством 457 изделий.

Проведен ряд измерений специально изготовленных и аттестованных стандартных образцов предприятия снаряженных шкалой специально изготовленных таблеток с содержанием оксида гадолия от 0 до 8%.

Установлено наличие значимого систематического расхождения результатов измерений и аттестованных значений содержания гадолия в таблетках, приводящее к занижению показаний установки до 0,7%. При этом видно, что установка различает таблетки с различным содержанием гадолия.

Обработка всего массива полученных данных не проводилась, т.к. программное обеспечение установки «Анфер» не позволяет производить обмен информации с другими программными приложениями.

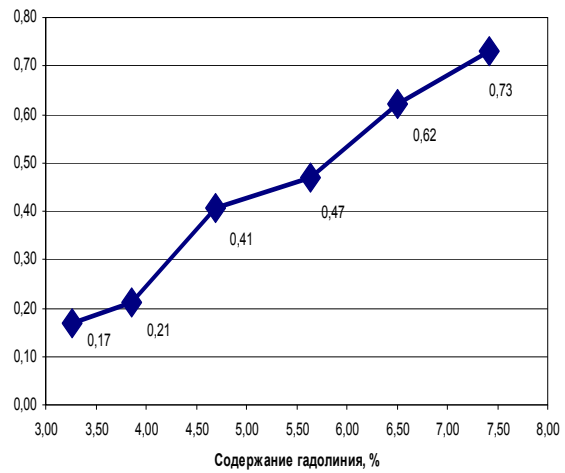


Рис. 7. Разность результатов измерений и аттестованных значений содержания гадолия

Сравнительные данные паспортных значений образца № У457 и результатов контроля на установке «Анфер» приведены на рис. 7.

Перепроверка изделий партии 536 00561:

№11 - 114 раз измерено, сбой - 67 замеров, 47 без отклонений от типичного. №40 - 14 раз измерено. Сбой 5, нормально - 9. №55 - 14 раз измерено. Сбой 6, нормально - 8;

№13 - 10 раз измерено. Сбоев нет, 10 раз показало превышение содержания гадолия в таблетке №114. Показания лежат в пределах 7,2 - 7,8%.

Проведён рентгенографический контроль этих изделий. Никаких отклонений от типичных твэгов не выявлено.

Проведено тщательное обследование отобранных изделий на наличие кривизны и механических повреждений, а также измерены диаметры и эллипсность оболочек. Отклонений не выявлено.

Изделия №11 и №13 отобраны из штатной партии для дальнейших исследований.

Изделие №13 разделано и из него извлечены 5 шт. таблеток с №112 по №116. Выделив эти таблетки в отдельную зону и снаряжая ими в различной очерёдности изделие №13, проводили контроль этого изделия на установке. Гарантированно выявлено, что именно таблетка №114 показывает превышение содержания гадолиния.

Таблетка №114 была передана в ц.38 для проведения измерения пористости и плотности, а также химического анализа на соответствие техническим условиям. Результаты анализа приведены в таблице 2. Установлено превышение норм ТУ по железу и алюминию. Остальные показатели соответствуют ТУ.

Таблица 2
Результаты химического анализа

Дата отгрузки	обогащение	партия	элемент	Результат у.м.д. %
02.03.10	3,6	E29724	Al	0.020- 0.041
02.03.10	3,6	E29724	B	<0,00003
02.03.10	3,6	E29724	Ca	<0,01
02.03.10	3,6	E29724	Cd	<0,00003
02.03.10	3,6	E29724	Cr	0,0034
02.03.10	3,6	E29724	Cu	<0,001
02.03.10	3,6	E29724	Fe	0.011-0.071
02.03.10	3,6	E29724	Gd ₂ O ₃	5,16
02.03.10	3,6	E29724	Mg	<0,01
02.03.10	3,6	E29724	Mn	<0,001
02.03.10	3,6	E29724	Mo	<0,003
02.03.10	3,6	E29724	Ni	<0,003
02.03.10	3,6	E29724	P	<0,01
02.03.10	3,6	E29724	Si	<0,003
02.03.10	3,6	E29724	V	<0,001
02.03.10	3,6	E29724	Zn	<0,002

Проведено детальное сравнение полученных сигналов от изделия №11, на котором происходят частые сбои, с сигналами от изделий, не дающих сбоев. Сравнивались величина и форма сигналов от таблеток, от фиксаторов, от заглушек, общее количество замеров и т.д. Различий выявить не удалось.

Выявлено, что сбои происходят в процессе передачи информации от программы VortexGD, которая снимает и обрабатывает сигналы, к программе SniperGD, вычисляющей по этим сигналам содержание гадолиния, высоты таблеток и длины топливного столба.

Выводы

1. Результаты контроля штатной продукции измерительной системы «АНФЕР» показали недостаточную достоверность, что связано со

следующими причинами:

- недоработка программного обеспечения и алгоритма оценки результатов измерений;
- влияние примесей железа.

2. Измерительный канал системы показал удовлетворительные результаты по идентификации таблеток с различным содержанием гадолиния в пределах $\pm 1\%$ абс. и их местонахождения.

Заключение

Результаты испытаний двух измерительных систем показали возможность использования электромагнитной методики измерения содержания оксида гадолиния в топливной таблетке в снаряжённом твэле с погрешностью $\pm 1\%$. Готовность к промышленному применению у системы «АНФЕР» значительно выше, чем у системы НИИ интроскопии за счёт имеющегося в её составе механизма сканирования с блоком управления, узлов разгрузки и выгрузки твэла, более мощной магнитной системы (1200 кА/м) и развитого специального программного обеспечения.

Однако, в настоящее время выйти на заданную погрешность измерения оксида гадолиния в топливной таблетке не удалось. В основном из-за упомянутых выше недоработок программного и аппаратного обеспечения. Кроме того, остаётся открытым вопрос с метрологическим обеспечением, т.к. применяемые в системе «АНФЕР» стандартные образцы с условной плотностью оксида гадолиния значительно отличаются по своим свойствам от реальной топливной таблетки, что в конечном счёте оказывает влияние на уровень неисключенной систематической погрешности. Если учесть тот факт, что система контроля на испанском заводе ENUSA [2] имеет погрешность измерения также $\pm 1\%$ при том, что их топливная таблетка практически не содержит примеси железа, то результаты испытаний наших измерительных систем можно считать обнадеживающими.

ЛИТЕРАТУРА

1 Горский В.В. Уран-гадолиниевое оксидное топливо. Неразрушающий контроль содержания Gd₂O₃ в твэлах с таблетками (U,Gd) O₂, «Атомная техника за рубежом», 1990 г., вып.1, стр. 3-8.

2 A. Domingo, J.M. Jimenez, J.I. Ortiz – ENUSA, Spain. Elektromagnetic and Gamma Scanning Inspection of Nuclear Fuel Rods at ENUSA. Доклад на 7-ой Европейской конференции по неразрушающему контролю. 26-29 мая 1998 г. Копенгаген

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПЛАНТАТОВ ИЗ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ТИТАНА МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ

Шаркеев Ю.П., Клименов В.А.*, Белявская О.А., Капранов Б.И.*, Белкин Д.С.*,
Ерошенко А.Ю.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634021, Россия, г. Томск,
пр. Академический, 2/4

*Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: sharkeev@ispms.tsc.ru

Введение

Получающие все большее распространение нанотехнологии позволяют создавать новые материалы и изделия из них с экстраординарными эксплуатационными свойствами, в том числе материалы для медицины. В дентальной имплантологии с 1951 г. после открытия П. Бронемарком явления остеоинтеграции в качестве материала для имплантации стали обоснованно использовать нелегированный титан, полностью соответствующий требованиям по биосовместимости, но по механическим свойствам – лишь частично. Современные достижения по формированию наноструктурированного состояния в титане (как и в других металлах и сплавах) методами интенсивной пластической деформации, позволяющими повышать его механические свойства до уровня свойств среднепрочных титановых сплавов, сохраняя стабильность структуры и свойств до 300°C, привлекают внимание разработчиков изделий медицинского назначения. Для имплантологии, в первую очередь, для дентальной, разработаны имплантаты из наноструктурированного (НС) титана [1], имеющие преимущества перед широко используемыми имплантатами из титановых сплавов в части сокращения сроков, необходимых для остеоинтеграции, снижения вероятности отторжения имплантатов организмом. Контроль микроструктуры и качества изделий из наноструктурированных материалов, обеспечивающий соответствие материала запланированному уровню механических свойств при соблюдении технологии изготовления, обычно производят разрушающими методами. Разработка неразрушающих экспрессных методов анализа таких материалов с целью обеспечения гарантий качества изделий, производимых из наноструктурированных материалов, в частности медицинских имплантатов, является актуальной физической задачей. В настоящее время не существует методик косвенной (без разрушения) оценки однородности структуры наноструктурированных материалов и изделий из них по физическим характеристикам материала, зависимость от характеристик структуры [2].

В работе впервые проведены комплексные исследования возможностей рентгеновской

трансмиссионной томографии высокого разрешения (микротомография) для контроля изделий из наноструктурированного / ультрамелкозернистого (НС / УМЗ) титана, дентальных имплантатов. В отличие от других методов неразрушающего контроля микротомография позволяет производить неразрушающие исследования внутренней трёхмерной структуры изделий без их предварительной обработки и подготовки [3, 4].

Объект и методы исследования

Прутки титана ВТ1-0 в НС / УМЗ состоянии получали комбинированным методом интенсивной пластической деформации, включающим многократное прессование в пресс-форме и последующую прокатку. Из прутков были изготовлены дентальные имплантаты [1] в соответствии с ТУ 942422.001-010.

Электронно-микроскопические исследования были выполнены на просвечивающих электронных микроскопах ЭМ-125 К и Technai G2. Для электронно-микроскопических исследований готовились «тонкие фольги» из поперечного и продольного сечений прутков. Микроструктурные исследования включили анализ формы и размеров элементов структуры (зерна, субзерна, фрагменты) и измерение размеров структурных элементов и последующую их статическую обработку. Измерения микротвердости проводили в продольном и поперечном сечениях прутка на приборах ПМТ-3М и Duramin 5 при нагрузке 1 Н.

Исследования возможностей рентгеновской трансмиссионной томографии высокого разрешения (микротомография) выполнены на томографической установке «Орёл», разработанной в лаборатории технических средств неразрушающего контроля МИРЭА (г. Москва). Установка «Орёл» является испытательным комплексом, позволяющим исследовать возможности современных цифровых методов радиационного неразрушающего контроля для испытания материалов. Возможности установки определяются рабочими характеристиками: напряжение на аноде-40 – 120 кВ, ток анода – до 120 мкА, разрешающая способность-15 мкм. Установка (рис. 1) содержит микрофокусную рентгеновскую трубку 1, стол перемещения 3 объекта контроля 2, платформу 5 перемещения детекторной матрицы с полем зрения 200x300 мм

и с размером пиксела 90x90 мкм и механизм вращения объекта 4.

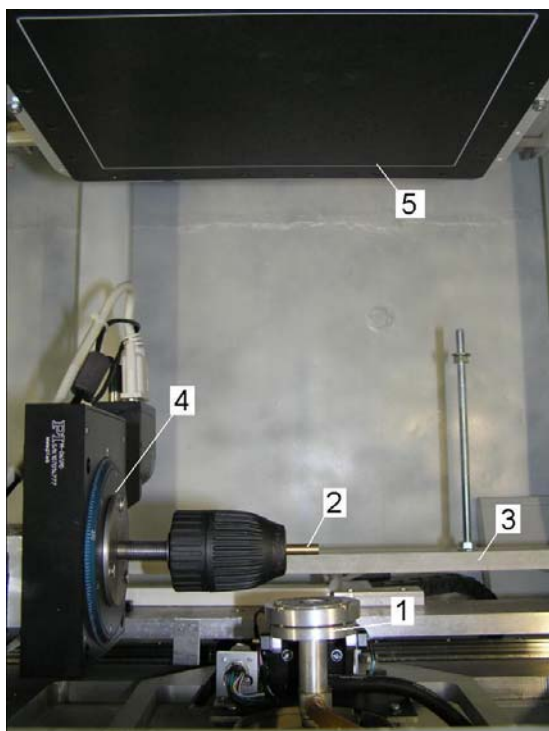


Рис. 1. Схема томографического сканирования объекта в установке «Орёл»

Установка позволяет реализовать режимы цифровой радиографии, ламинографии и томографии в конических пучках. Наличие полного комплекса взаимного перемещения источника, объекта, детектора позволяет получать

необходимое количество лучевых проекций объекта для математической реконструкции внутренней структуры.

Результаты эксперимента

Комбинированный метод интенсивной пластической деформации, включающий абс-прессование в пресс-форме и прокатку в ручьевых валках с последующим дорекристаллизационным отжигом [5] позволяет получать прутки титана в НС / УМЗ состоянии с однородной структурой по всему объему заготовки. В случае применения пресс-формы средний размер элементов зеренно-субзеренной структуры (зерна, субзерна, фрагменты) составил 100 нм и менее (рис. 2), что позволяет отнести такое состояние к НС. Для оценки однородности механических свойств по объему заготовки проводили измерение микротвердости в различных сечениях полученных прутков из НС / УМЗ титана. В исходном крупнозернистом (КК) состоянии микротвердость титана составляет 2100 МПа. Измерения показали, что применение комбинированного метода абс-прессования в пресс-форме с прокаткой обеспечивает значительный прирост уровня микротвердости в заготовках наноструктурированного титана до 3200 МПа.

НС / УМЗ состояния в титане обеспечивает значительное повышение механических свойств по сравнению с крупнозернистым. В таблице 1 приведены данные по механическим свойствам заготовок титана ВТ1-0 в КК и НС состояниях. Здесь также приведены данные для титанового сплава ВТ6.

Таблица 1

Механические характеристики титана ВТ1-0 в КК и НС / УМЗ состояниях и сплава ВТ6

Материал	d, мкм	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	σ_0 , МПа	δ , %	H_{μ} , МПа
КК состояние, ВТ1-0	15	270	400	300	23	1800-2100
НС / УМЗ состояние, ВТ1-0	0,1	1100	1160	580	6	3200
Сплав ВТ6	20	1000	1100	570	>6	3500

d – средний размер структурных элементов; $\sigma_{0,2}$ – предел текучести; σ_b – предел прочности; δ – относительное удлинение до разрушения; σ_0 – предел выносливости при циклическом изгибе на базе $3 \cdot 10^6$ циклов; H_{μ} – микротвердость

Отметим, что уровень механических свойств прутков титана в НС / УМЗ состоянии соответствует свойствам среднепрочных титановых сплавов, применяемых в медицине, например, ВТ6.

В настоящее время имеется возможность получения прутков необходимого сечения, длиной от 500 мм и более, что удовлетворяет требованиям к заготовкам для выполнения с ними операции точной механической обработки на токарных и

фрезерных станках с ЧПУ или токарно-фрезерных автоматах. НС / УМЗ состояние титана не только не увеличивает трудоемкость и не ухудшает качества механической обработки, а, напротив, обеспечивает повышение этих показателей по сравнению с крупнокристаллическим титаном.

В ИФПМ СО РАН совместно с НГИУВ (г. Новокузнецк) и СХК (г. Северск Томской области) с участием СибГМУ (г. Томск) разработаны и запатентованы современные

конструкции внутрикостных дентальных имплантатов различных модификаций из НС / УМЗ титана ВТ1-0 (рис. 3) [1, 6].

повышенную остеоинтеграцию разработанных имплантатов. Клинические испытания комплекта дентальных имплантатов из НС / УМЗ титана с

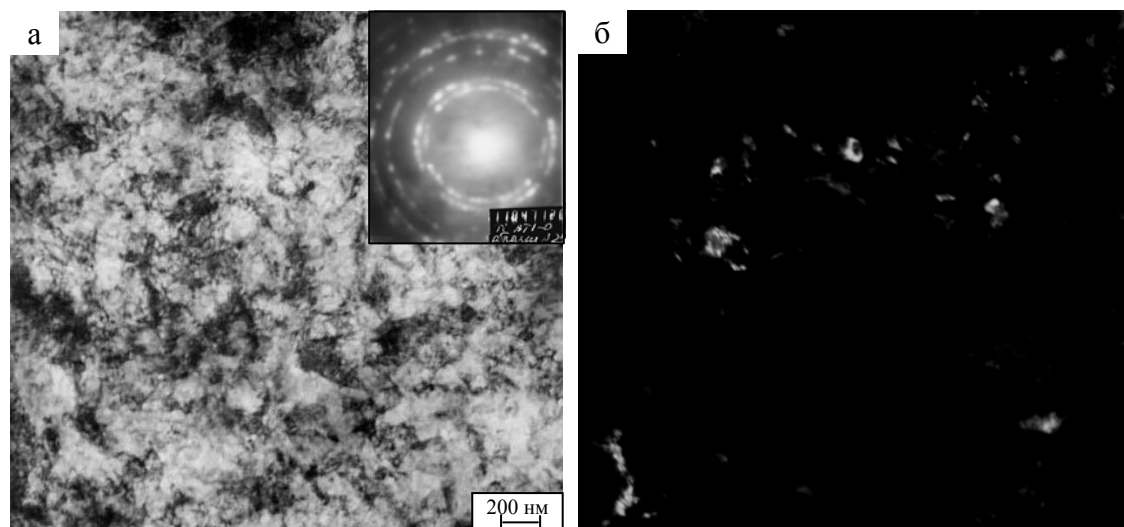


Рис. 2. Светлопольное (а) с соответствующей микродифракцией и темнопольное (б) изображения микроструктуры НС / УМЗ титана

Из прутков НС титана ВТ1-0 изготовлены опытные партии дентальных имплантатов, инструментов и принадлежностей по ТУ 942422.001-010. Проведены технические приемочные, морфологические, токсикологические, клинические и квалификационные испытания дентальных имплантатов, инструментов и принадлежностей. Результаты испытаний показали, что дентальные имплантаты из НС / УМЗ титана нетоксичны и апиrogenны, отвечают техническим требованиям нормативной документации. Результаты морфологических исследований подтвердили

инструментами и принадлежностями показали, что они отвечают предъявляемым требованиям, имеют хорошие эксплуатационные и функциональные качества, рекомендуются к применению в стоматологической практике на территории РФ.

При организации производства высококачественных дентальных имплантатов из НС титана актуальна и разработка неразрушающих экспрессных методов анализа изделий, соответствия их внутренних полостей и внешней конфигурации требованиям конструкторской документации.

Основа реконструкции – алгоритм обратного проецирования с фильтрацией лучевых проекций. Одна из целей исследования заключалась в изучении возможностей компенсации артефактов реконструкции, возникающих при контроле объектов с малыми размерами на границе зоны реконструкции и связанных с резким перепадом интенсивности потока излучения в детекторе при переходе через границу среда – воздух. Пример такого артефакта приведён на рис. 4а. На сечении верхней части имплантата с внутренним шестигранником отчётливо наблюдается почернение внешней границы. В томографии существуют программные методы коррекции таких артефактов [7]. Однако они не позволяют решить задачу в широком диапазоне материалов и размеров.

В данной работе исследован метод “физической коррекции”, основанной на использовании компенсатора, выводящего границу зоны реконструкции за границу контролируемого изделия. Были исследованы



Рис. 3. Комплект дентальных винтовых имплантатов из НС / УМЗ титана ВТ1-0

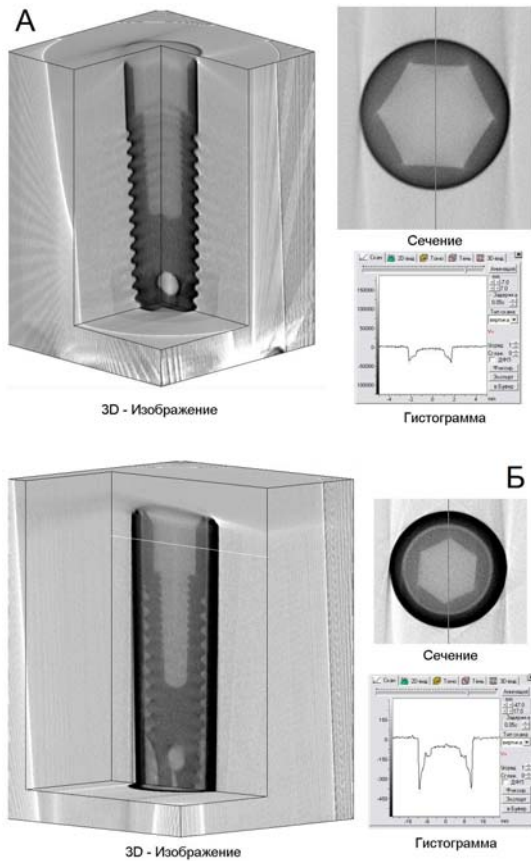


Рис. 4. Сечение верхней части имплантата (А), сечение верхней части имплантата с компенсатором (Б)

компенсаторы из разных материалов. Анализ показал, что оптимальным является компенсатор из такого же материала, что и объект. Поэтому были изготовлены цилиндры из наноструктурированного титана с толщиной стенки 0,5 мм, в которых закреплялся контролируемый образец. На рис. 4б. показан пример реконструкции при наличии компенсатора

из такого же материала, что и изделие. Из рисунка видно, зона артефакта выведена в компенсатор. Плотность по сечению имплантата является однородной.

Для каждого изделия можно получить массив сечений с шагом 100 мкм. Набор этих сечений позволяет построить 3D изображение внутренней структуры изделия [8].

С помощью разработанной технологии контроля были исследованы образцы восьми дентальных имплантатов, изготовленных из прутков титана ВТ1-0, наноструктурированных и забракованных на разных стадиях их механической обработки. На рис. 5 приведены 3D-изображения некоторых образцов, обнаруживающие их дефекты. Анализ 3D-изображений показывает, что метод позволяет выявить все возможные макродефекты и прежде всего скрытые дефекты, возникшие как на стадии получения заготовок, так и на стадии механической обработки заготовок и получения изделий. Метод также позволяет оценить соответствие внешней и особенно внутренней форм изделий.

В тоже время необходимо отметить, что метод микротомографии не позволяет исследовать тонкую структуру объекта. Для этого требуются другие методы исследования, в частности, это оптическая, просвечивающая и растровая электронная микроскопия и другие методы. Перечисленные методы и микротомография взаимно дополняют друг друга и имеют свои ниши применения. Метод микротомографии является неразрушающим методом и его объектами, прежде всего, являются скрытые макродефекты. Кроме того, этот метод производителен. Так для осмотра одного изделия с использованием рассматриваемой установки необходимо не более 3-х мин.

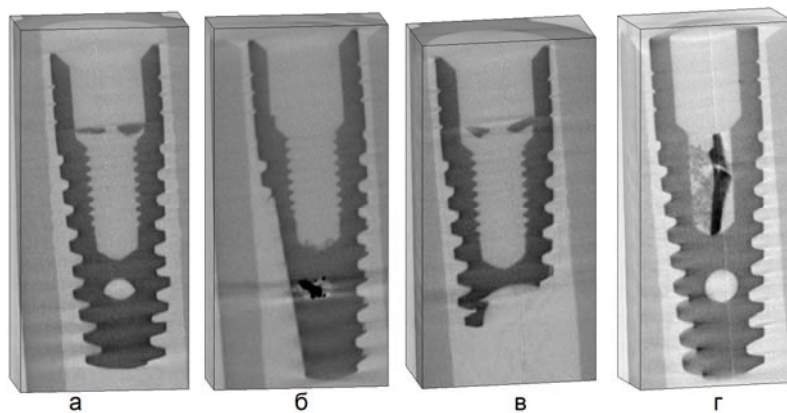


Рис. 5. Томографические изображения имплантатов: а) соответствует документации, но форма отверстия эллипсоидная и на переходе к внутренней резьбе наблюдается деформация металла; б) не соответствует документации и наблюдается более плотное включение в металле; в) наблюдается слом в нижней части имплантата; г) отсутствует внутренняя резьба, в отверстии находится включение

Заключение

1. Метод рентгеновской томографии информативен и позволяет оценивать соответствие внешней и внутренней формы имплантатов требованиям конструкторской документации, обнаруживать макродефекты в виде заусенцев, стружки, инородных включений во внутренних полостях имплантатов. Метод перспективен и для оценки сопряжения покрытия с поверхностью имплантата в случае использования варианта конструкции имплантатов с биоактивным покрытием.

2. Метод рентгеновской томографии достаточно производителен и не требуется его оснащение сложной оснасткой для использования томографа с целью контроля имплантатов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН, проект 18.2; Программы фундаментальных исследований СО РАН, 2010-2012г.г., III.20.2, проект III.20.2.2

Авторы признательны ЦКП «Лаборатория электронной микроскопии» НГТУ, г. Новосибирск, за предоставленную возможность провести исследование микроструктуры наноструктурированного титана ВТ1-0.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент на изобретение «Дентальный внутрикостный имплантат» RU 2376955 (Опубл. 27.12.2009 Бюл.№ 36) Шаркеев Ю.П., Белявская О.А., Поленичкин В.К., Климентенко О.П., Фортунa С.В., Поленичкин С.В.

2. А.Б. Ринкевич, Ю.В. Корх, Я.Г. Смородинский Перспективы применения неразрушающего контроля для диагностики нано- и микроструктурных материалов // Дефектоскопия, V. 1, N., pp.14-20 (2010)

3. Хермен Г. Восстановление изображений по проекциям. Основы, реконструктивной томографии. - М.: Мир, 1983. - 350с.

4. Наттерер Ф. Математические аспекты компьютерной томографии: Пер. с англ.. -М: Мир, 1990.- 288 с

5. Патент РФ на изобретение №2315117 от 20.01.2008 г. Способ деформационной обработки материалов и устройство для его осуществления. Братчиков А.Д., Шаркеев Ю.П., Колобов Ю.Р., Ерошенко А.Ю., Калашников М.П

6. Патент на изобретение RU 2418092 (Опубл. 10.05.2011). «Способ получения титановых заготовок многогранной и круглой формы в наноструктурном состоянии и устройство для деформационной обработки титановых заготовок» Шаркеев Ю.П., Коробицын Г.П., Толмачев А.И., Ерошенко А.Ю., Белявская О.А.

7. Хофер М. Компьютерная томография. Базовое руководство. - М.: Медицинская литература, 2006. -208 с.

8. Ю.А. Жуков, Ю.К. Карлов, Ю.В. Обидин, К.В. Петухов, А.К. Поташников, В.Ю. Сартаков, С.Б. Чашин. Компьютерная панорамная томография промышленного применения // Дефектоскопия. - 2008. - №9. - 27-37.

РЕНТГЕНОВСКИЙ СКАНЕР ОБРАТНОГО РАССЕЙЯНИЯ ДЛЯ ДОСМОТРА АВТОТРАНСПОРТА

Манушкин А.А., Андрианов М.В., Лебедев М.Б., Чахлов С.В.

Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики,
105275, г. Москва, ул. 5-й Соколиной горы, 22

E-mail: manushkinaa@mail.ru

Работа посвящена практическим аспектам реализации рентгеновских сканеров обратного рассеяния для задач антитеррористической диагностики.

Введение

В последнее время в мире наблюдается значительный рост терроризма и наркоторговли. Участились случаи использования транспортных средств в качестве оружия, содержащего большие объемы взрывчатых веществ, для совершения крупномасштабных террористических актов. Среди широкой номенклатуры антитеррористических средств ведущее место принадлежит поисковым устройствам, основанным на использовании методов радиационной интроскопии, которые обладают большой информативностью, возможностями наблюдения внутреннего содержимого объекта и обнаружения и определения местоположения средств террористической угрозы.

В настоящее время все более широкое распространение получают рентгеновские сканеры обратного рассеяния (РСОР), которые обладают уникальными возможностями, поскольку позволяют производить досмотр объектов в условиях, когда применение обычного трансмиссионного просвечивания невозможно или его возможности ограничены. Прежде всего, это относится к негласному досмотру автотранспорта, контейнеров, ограждений с целью обнаружения скрытых объектов, в том числе взрывчатые вещества, наркотиков или людей. Другим преимуществом использования РСОР является низкая доза облучения объекта и использование узкого направленного коллимированного пучка излучения, что дает возможность использования этих сканеров в полевых условиях без использования стационарных средств радиационной защиты.

Постановка задачи

Принцип действия рентгеновского сканера обратного рассеяния основан на последовательном сканировании объекта узким коллимированным (“карандашным”) пучком и регистрации обратно рассеянного излучения детектором [1]. Информация об интенсивности регистрируемого рассеянного излучения, его спектральном и угловом распределении может быть использована для построения изображения внутреннего содержимого объекта. При высокой коллимации рентгеновского излучения, ограниченной эффективности и площади

регистрации рассеянного рентгеновского излучения, и небольшом контрасте изображения, связанным с большим фоном от корпуса автомобиля и поглощением обратно - рассеянного излучения, отношение сигнал/шум является обычно невысоким. Таким образом, в общем случае, задача создания рентгеновского сканера обратного рассеяния для обнаружения скрытых вложений внутри автотранспорта является экстремальной, и ее решение возможно с использованием мощных кабельных рентгеновских аппаратов и множества блоков детектирования на основе монокристаллических сцинтилляторов и ФЭУ. Специализированные системы, которые характеризуются большими габаритами, массой и высокой стоимостью, были созданы фирмой American Science and Engineering, Inc (AS&E) как в стационарном варианте для досмотра крупногабаритного транспорта, так и в мобильном варианте при размещении на шасси автомобиля.

Практика проведения оперативно-технических мероприятий по борьбе с терроризмом показала, что одним из определяющих требований к досмотровым средствам является возможность осуществления контроля в полевых условиях (на улицах города, в помещениях зданий, на контрольно-пропускных пунктах и т.п.).

В связи с этим, настоящее время основным направлением в разработке РСОР, ведущихся в настоящее время в МИРЭА является создание досмотровых малогабаритных систем, которые можно размещать как стационарно, так и доставлять в места досмотра на автомобиле.

Сканер обратного рассеяния

Для уменьшения стоимости, потребляемой мощности и улучшения массогабаритных характеристик, за основу создания сканера обратного рассеяния (Рис.1), разработанного в МИРЭА, было положено использование моноблочных рентгеновских аппаратов мощностью до 1.5 кВт и детекторов рассеянного излучения на основе промышленных широкоформатных усиливающих экранов.

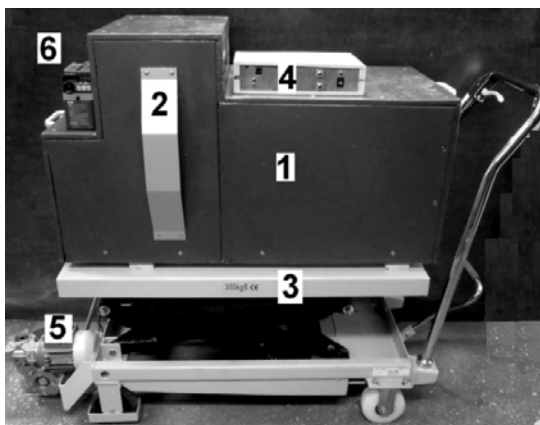


Рис.1. Сканер обратного рассеяния

Сканер (Рис.1) представляет собой рентгеновский излучатель с механизмом вращения коллиматоров, размещенные в рентгенозащитном корпусе (1) с выходным окном рентгеновского излучения (2).

При включении вращения коллиматоров и рентгеновского излучателя происходит периодическое перемещение рентгеновского пучка вдоль выходного окна, и таким образом осуществляется поперечное строчное сканирование объекта, размещенного напротив установки. Для продольного смещения плоскости сканирования по объекту осуществляется медленное и равномерное горизонтальное перемещение сканера на пятиколесной платформе, снабженной механизмом линейного перемещения (5). Управление скоростью линейного и углового перемещения осуществляется программно или вручную с помощью частотных преобразователей. Сбор данных от детектора и оптопары колеса вращения коллиматоров осуществляется контроллером, связанным с ПК по кабелю последовательного интерфейса.

При досмотре транспортных средств вместо перемещения сканера можно использовать самостоятельное перемещение этих средств относительно сканера.

С целью позиционирования сканера по вертикали платформа снабжена гидравлическим подъемным механизмом с ножным приводом.

Таблица 1
Технические характеристики РСОР

Метод сканирования рентгеновского пучка	Поперечное угловое сканирование с системой из 6-ти вращающихся коллиматоров и продольное линейное сканирование посредством линейного перемещения установки вдоль объекта
Частота вращения коллиматоров	Регулируемая, от 2 до 10 об/сек

Скорость линейного перемещения	Регулируемая, максимальная - 50мм/сек.
Угловой сектор сканирования	55 град
Время непрерывного сканирования объекта	Не более 5 минут
Источник излучения:	Рентгеновский моноблочный аппарат максимальное анодное напряжение - до 300 кВ максимальный анодный ток - до 3 мА
Охлаждение анода рентгеновской трубки	Водяное принудительное, замкнутый контур. Охлаждающая жидкость - тосол. Охлаждение теплообменных радиаторов - воздушное, с принудительной вентиляцией.
Тип детектора излучения:	Двухканальный регистратор рентгеновских фотонов с усиливающими экранами и ФЭУ
Режим работы детектора	Счетный, максимальная частота загрузки по одному каналу - 10МГц.
Габаритные размеры детектора, мм:	1500 (высота)×350(ширина) × 250(толщина)
Габаритные размеры сканера с установленным на нем детектором, мм	Высота : 1550 - при минимальной высоте подъема 2500 - при максимальной высоте подъема Ширина – 750
Масса кг, не более	150
Сканера	10
Детектора	
Общая потребляемая мощность:	не более 1.2 кВА

Детектор рассеянного излучения

Детектор обратного рассеяния представляет собой световой короб с зеркалами внутри которого в 4 слоя располагаются широкоформатные усиливающие экраны. Светосбор осуществляется с помощью ФЭУ большого диаметра, расположенными по торцам светового короба. Из-за ограниченного светосбора неизбежно происходит потеря информации об энергии регистрируемого рассеянного излучения, однако при этом нет необходимости использовать люминофор с малым временем высвечивания, чтобы обеспечить возможность большой загрузки детектора.

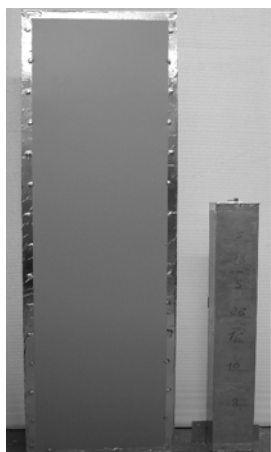


Рис.2. Детекторы рассеянного излучения

При выборе усиливающего экрана мы руководствовались тем, что через стальную стенку автомобиля толщиной около 1-2 мм могут выйти изнутри только кванты с энергией более 60 кэВ, и поэтому целесообразно использование экранов чувствительных к более жесткому рентгеновскому излучению, каковыми из промышленных экранов в настоящее время являются гадолиниевые и вольфраматные, характеристики которых приведены в табл.2.

Таблица 2

Люминофор	Плотность [г/см ³]	Время распада а [нс]	Эффективность [%]	Максимум эмиссии [нм]
CaWO ₄	6.1	6×10 ³	5	420
Gd ₂ O ₂ S:Tb	7.3	6×10 ⁵	13–16	540

Проведенные нами испытания показали, что для досмотра автомобилей большее отношение сигнала к шуму дают гадолиниевые экраны. По-видимому, это связано с тем, что последние дают значительно больший световыход в сравнении с вольфраматными экранами. Очевидным недостатком гадолиниевых экранов является большое время высвечивания порядка 600 мсек. Поэтому выбор данного экрана является компромиссным, с учетом того, что для обнаружения больших объемов взрывчатого вещества можно загрузить пространственное и временное разрешение сканера, установив время сканирования на пиксел на уровне 200 - 300 мкс. Были разработаны два детектора: большой детектор с площадью регистрации 120х30 см и одним ФЭУ и маленький с площадью регистрации 50х10см². (Рис.2). Расчетная эффективность поглощения квантов рассеянного рентгеновского излучения составила 50% в диапазоне от 60 до 100 кэВ.

Результаты испытаний сканера

С использованием сканера обратного рассеяния были получены изображения легковых автомобилей при различных режимах работы рентгеновского излучателя. Для регистрации

излучения использовался детектор небольшого размера с площадью регистрации 400х10 см², представленный на рис.2 справа.

На рис.3а в багажном отсеке автомобиля различим человек в согнутом положении и резиновая крышка. На рис.3б рядом с крышкой различима пластиковая канистра емкостью 5л с водой.

Увеличение напряжения рентгеновского излучателя существенно улучшает контраст внутреннего содержимого автомобиля. На рис. 4 различимы канистра с водой в багажном отделении (1) и пластиковая бутылка с водой емкостью 3л на переднем сидении. Кроме того при увеличении напряжения трубки стали хорошо заметны пластиковые и алюминиевые детали дверей автомобиля.

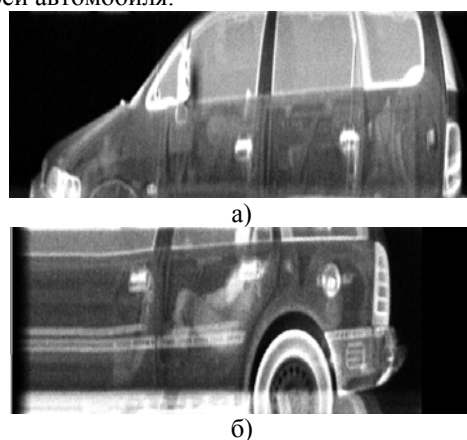


Рис.3. Комптоновские изображения автомобиля при U=160 кВ, I=5 мА

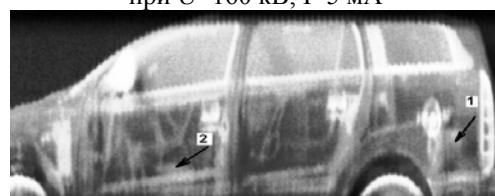


Рис.4. Комптоновские изображения автомобиля при U=300 кВ, I=3 мА

Заключение

Полученные результаты показывают, что малогабаритные сканеры обратного рассеяния могут быть применены для досмотра легкового автотранспорта в целях антитеррористической диагностики. Отметим также, что существуют возможности дальнейшего улучшения качества полученных изображений, связанные с использованием детектора большей площади и улучшения светосбора излучения в световом коробе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dinca, Dan-Cristian; Schubert, Jeffrey R.; Callerame, J. , X-ray backscatter imaging // Proceedings of the SPIE, Volume 6945, pp. 694516-694516-13 (2008)

АППАРАТУРА ДЛЯ ДОСМОТРА РУЧНОЙ КЛАДИ И БАГАЖА. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ

Щетинкин С.А., Аметов В.И., Чумаков Д.М., Усачев Е.Ю.

Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики
105275, г. Москва, ул. 5-ой Соколиной горы, д.22

E-mail: ssaft@rambler.ru

В настоящее время рентгеновские системы повсеместно используются для обнаружения оружия, самодельных взрывчатых веществ и других запрещенных к провозу веществ. Опытному оператору не составляет труда по рентгеновскому снимку опознать множество объектов как опасных, так и безопасных.

Это особенно справедливо для металлических объектов, которые очень хорошо заметны на окружающем их фоне. Многие взрывчатые вещества, благодаря своему органическому составу, не слишком заметны на снимках и могут быть не замечены оператором. За последние 15 лет основные усилия были направлены на развитие автоматического компьютерного анализа рентгеновских снимков.

Оборудование первого поколения характеризуется наличием бокового источника рентгеновского излучения, коллимируемого в широкий конусный пучок, который проходит через багаж и регистрируется рентгеноскопическим экраном. Прогресс в электронике привел к появлению следующего поколения досмотровых рентгеновских систем. Эти системы характеризуются наличием бокового веерного пучка рентгеновских лучей, падающих на длинный массив сцинтилляторов, оптически спаренных с фотодиодами или фототранзисторами. Полученные слабые электрические токи затем усиливаются, интегрируются и оцифровываются [1]. С конца 80-х годов прошлого века досмотровые системы были модернизированы для получения данных для двух энергий рентгеновского излучения. Эти данные снимались с двух смежных массивов детекторов, имеющих такие толщины и фильтры, чтобы регистрировать высокую и низкую компоненты спектра энергии падающего рентгеновского излучения. Атомный номер каждого элемента изображения кодировался цветом, а ослабление по-прежнему кодировалось интенсивностью. С 1990 года несколько компаний разработали системы с автоматическим распознаванием на основе точных измерений эффективного атомного номера (Zeff) [Например 2]. В то же время стало очевидным, что знания только Zeff не достаточно. В обиход стали входить системы, которые объединяют оборудование, основанное на разных физических принципах и методах компьютерной томографии.

Рентгеновские системы досмотра багажа можно разделить по технологиям в зависимости от используемого физического принципа и

наличия автоматического компьютерного распознавания подозрительных объектов. Многие из этих технологических систем обычны в аэропортах, правительственных зданиях и других местах контроля безопасности. Традиционные рентгеновские системы используются в сочетании с операторами, которые просматривают рентгеновские изображения и ищут на них опасные или запрещенные к провозу объекты. Эти системы обычно используют низко-киловольтные рентгеновские аппараты (менее 150 кВ) и применяются для контроля в аэропортах, общественных зданиях, входящих посылок и объектов, посылаемых почтовыми и другими перевозчиками.

Системы с дуальными энергиями дают два проекционных изображения инспектируемого объекта, полученные для разных диапазонов энергий рентгеновского излучения, обозначаемые символами HI и LO. Разное ослабление сигнала на этих снимках позволяет определить эффективный атомный номер Zeff [3]. Для получения HI и LO снимков было предложено несколько методов. Это, так называемые, истинно дуальные системы, которые меняют спектр рентгеновского излучения. Это достигается либо использованием двух отдельных изображающих систем, работающих на разных энергиях, либо быстрым чередованием энергий в одной системе. Дуальные системы с фильтром используют спектр одной энергии, но применяют детекторы, которые регистрируют разные части спектра. Это достигается путём изменения типа, толщины и фильтров детекторов. Как правило, истинно дуальные системы точнее определяют Zeff.

Многоракурсные / томографические системы используют несколько разноракурсных проекций багажа. Они регистрируют большой объём подробной информации о каждом отдельном предмете в объекте багажа. Оценка плотности повышает вероятность обнаружения взрывчатых веществ [4, 5].

Информация о рассеянном рентгеновском излучении часто дополняет информацию с проекционных изображений. Рентгеновское излучение рассеивается главным образом посредством Комптоновских (некогерентных) взаимодействий. Метод состоит в использовании разного рассеивания органикой и металлами [6]. Материалы с низким Z рассеивают рентгеновское излучение довольно эффективно, в то время как материалы с высоким Z предпочтительнее поглощают излучение посредством

фотоэлектрического поглощения и, следовательно, дают меньшее рассеивание.

Большинство взрывчатых веществ обладают кристаллической структурой. Т.к. кристаллы малы и случайно ориентированы, структуру иногда называют поликристаллической. Эти кристаллы дают сильно когерентное рассеивание в определённых направлениях, которые зависят от энергии рентгеновского излучения и шага кристаллической решётки. Такое когерентное рассеивание (также называемое дифракцией) является свойством кристаллической решётки и не связано с когерентным рассеиванием, происходящим на ядрах атомов. Это основы так называемых когерентных рентгеновских рассеивающих систем [7].

В настоящее время автоматические сканирующие досмотровые системы для обнаружения взрывчатых веществ интегрированы в комплексы обработки багажа. Обычно устанавливаются разные уровни досмотровых систем. Досмотр начинается с быстрых систем первого уровня и заканчивается более медленными системами или операторами на последующих уровнях [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. W.K. Stefanski, R. Beland, N.E. Watt, N. Neelakantan and C. Stefanski, "An x-ray inspection system for security screening application," in Proc. 1977 Int. Carnahan Conf. on Crime Countermeasures – Science and Engineering, J.S. Jackson (ed.), 25–29 July 1977, Oxford, UK, 77CH1230-2 AES, UKY BU113, University of Kentucky (1977) 57–64.
2. R.F. Eilbert and K.D. Krug, "Dual-energy x-ray scanner for detecting contraband," in Contraband and Cargo Inspection Technology International Symposium, 28–30 October 1992, Washington, DC, ONDCP and NIJ (1992) 209–217.
3. R.E. Alvarez and A. Macovski, "Energy selective reconstructions in x-ray computed tomography," Phys. Med. Biol., 21 (1976) 733–744.
4. P.J. Bjorkholm and T.R. Wang, "Contraband detection using x-rays with computer assisted image analysis," in Contraband and Cargo Inspection Technology International Symposium, 28–30 October 1992, Washington, DC, ONDCP and NIJ (1992) 111–115.
5. F.L. Roder, The evolution of computed tomography (CT) as an explosives detection modality, Proceedings of the First International Symposium on Explosive Detection Technology, 1991, pp. 297–308
6. P.J. Arvanitis, Developing an automated explosives detection prototype based on the AS&E 101ZZ system, Masters Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Virginia Tech. and State University, 1997
7. G. Harding and J. Kosanetzky, "Status and outlook of coherent x-ray scatter imaging," J. Opt. Soc. Am. A, 4(5) (1987) 933–944.
8. H. Ries, "Multi Level Concept for the Detection of Explosives", Springer, 2004, pp.45-52

РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КОЛЬЦЕВЫХ СВАРНЫХ ШВОВ В СИСТЕМЕ ТРУБА-ТРУБНАЯ ДОСКА

Усачев Е.Ю., Твердохлебов В.Н., Коковкин А.В., Чахлов С.В.

Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики, 105275, г. Москва, ул. 5-й Соколиной горы, 22

E-mail: tkhlebo@mail.ru

Неотъемлемой частью современных теплообменников, работающих с опасными и агрессивными средами (атомная энергетика, химическая промышленность и др.) являются сварные соединения «труба – трубная доска» (ССТТД), конструкции которых определены в [1], одна из них показана на рис.1.



Рис. 1. Пример конструкции сварного соединения труба - трубная доска

В качестве свариваемого материала обычно используются нержавеющие стали и титановые сплавы. Задача проведения 100%-го неразрушающего контроля указанных сварных соединений остаётся актуальной до настоящего времени. Это объясняется материаловедческими, и конструктивными особенностями сварных соединений, определившими в качестве основного сдаточного контроля радиационный контроль (РК). Радиографическим контролем в ССТТД выявляют поры, вольфрамовые включения и другие объёмные несплошности.

Общепринятые схемы просвечивания сварных ССТТД определены в [2] и показаны на рис.2.

Необходимо отметить, что контроль по схеме 2д, обеспечивая относительно высокую производительность (получение снимка всего сварного шва за одну экспозицию), требует применения малогабаритных острофокусных радиационных источников, в качестве которых десятилетиями использовался радионуклид Иридий-192 с типичными размерами активной части 1,0x0,5 мм.

При этом не прекращались исследования и разработки, направленные на замену Иридия-192 (эффективная энергия излучения Иридия-192 ~ 400 кэВ, он имеет относительно короткий для производства период полураспада ~ 74 дня)

другими радионуклидами, например Иттербий-169, но широкого применения в промышленности они не получили.

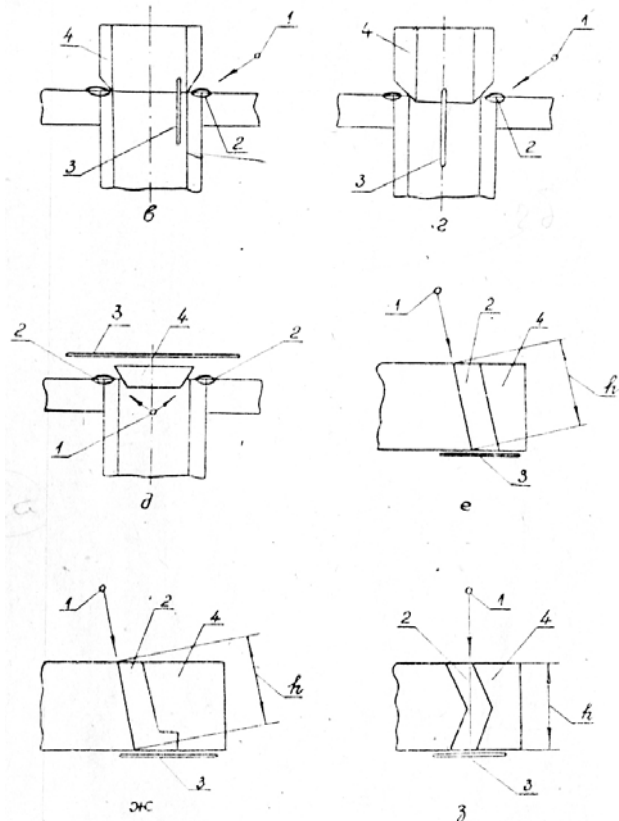


Рис. 2. Схемы контроля сварных соединений труба - трубная доска.

1 – источник излучения; 2 – контролируемый участок; 3 - кассета; 4 – приставка-компенсатор

Чувствительность радиографического контроля стальных ССТТД с использованием Иридия -192 и плёнки класса С3 (EN 548-1) составляет обычно W11 (0,32 мм) по проволочному эталону (ИКИ).

Косвенным подтверждением сложности проведения контроля по схемам рис.2 является действующее до настоящего времени следующее ограничение [3, п. 9.11.15], «сварки труб в трубные доски при номинальном внутреннем диаметре труб до 15 мм радиографическому контролю не подлежат, если нет специальных указаний в конструкторской документации».

Таким образом, можно обозначить следующие проблемы РК ССТТД:

- практическая невозможность использования гамма- и рентгенографического контроля ССТТД

для труб с внутренним диаметром менее 15 мм, особенно труб, изготовленных из более легких материалов, чем сталь;

- низкая радиографическая чувствительность при использовании радионуклида Иридий -192 и организационно-технические сложности, связанные с его применением (хранение, транспортировка, перезарядка, утилизация);

- высокая трудоёмкость и исключительно ручной характер работ по РК ССТТД.

Нами в 2007 году была поставлена опытно-конструкторская работа по созданию автоматизированной установки РК ССТТД по схеме рис.2д с программным управлением. Для комплектации установки предусматривалась разработка специализированного микрофокусного рентгеновского аппарата.

Предпосылками такого решения явились:

- возможность создания микрофокусной рентгеновской трубки с панорамным выходом излучения под углом 60° назад к оси трубки и диаметром вынесенного анода 6 мм;

- возможность достижения высокой радиационной чувствительности за счёт оптимизации энергии и схемы просвечивания для различных материалов;

- снижение трудоёмкости контрольных операций за счёт минимизации ручного труда.

За время проведения ОКР появилась информация о разработках аппаратуры в различных странах, направленных на повышение чувствительности и использование различных детекторов при РК ССТТД.

На 17-й международной конференции НМК был представлен доклад [4] о результатах контроля с использованием созданного кабельного рентгеновского аппарата излучатель которого имеет вынесенный анод длиной 40 мм с внешним диаметром 6 мм и фокусным пятном «менее 1 мм» (формулировка авторов доклада), при напряжении 130 кВ и анодном токе 2,4 мА (макс. 300 ватт). При контроле стальных образцов ССТТД на радиографической пленке класса С3 были выявлены искусственные несплошности размером 0,5 мм, а при использовании 4-х, расположенных вокруг анода, цифровых детекторов DIC100TH были выявлены подобные несплошности размером 0,3 мм. В данном случае, как и в других известных методиках, последовательная установка специальных кассет с пленкой и источника излучения (рентгеновской трубки) в различные каналы производится вручную. В докладе не приведены значения показателей качества изображения, определённые по стандартизованным ИКИ.

На той же конференции были представлены доклады по РК ССТТД с помощью радионуклида и линейки диодных детекторов с цифровой обработкой полученных данных [5,6]. В докладе [5]. на тест-образце демонстрируется возможность

получения разрешения до 5 пар линий/мм, но не оговариваются условия получения изображения: время экспозиции, материал и толщина исследуемого объекта, материал и толщина тест-объекта. На изображении стального проволочного IQI [6] видна проволочка W13, то есть проволочка диаметром 0,2 мм, на неуказанной толщине образца обычного стыкового сварного соединения.

По результатам ОКР нами был изготовлен образец автоматизированной установки РК ССТТД для контроля по схеме рис.2д, с программным управлением (рис.3).



Рис. 3. Общий вид установки

В установку входит моноблочный рентгеновский аппарат с выносным анодом длиной 150 мм при диаметре 12мм и оконечной частью диаметром 6 мм на длине 25 мм, фокусным пятном 60 мкм, током трубки 20- 200 мкА при напряжении 40÷100 кВ.

Разработанная установка имеет механизм согласования перемещений рентгеновского аппарата с фактическим расположением каналов в трубной доске.

После установки кассеты с пленкой на анод электромеханическое устройство по заданной программе вводит анод в канал, выдает команду на проведение экспозиции, выводит анод из канала после окончания экспозиции и устанавливает в позицию для контроля следующего канала. Оператор меняет кассету на неэкспонированную и нажатием кнопки «пуск» дает команду на выполнение следующего цикла.

В зависимости от типа трубной доски шаг перемещения, напряжение и время экспозиции могут регулироваться. Установка обеспечивает

контроль всех каналов без пропусков с соблюдением заданного режима просвечивания и выводом информации на ВКУ.

Для повышения уровня автоматизации и обеспечения надежного согласования маркировки пленки с номером контролируемого канала был разработан способ автоматической маркировки пленки номером канала, подлежащего в данный момент контролю. На способ и устройство поданы заявки на патент.

Отработка технологии контроля проводилась на натуральных образцах ССТТД, выполненных из титанового сплава; размер труб составлял $\varnothing 20 \times 2,5$ мм и $\varnothing 14 \times 1,5$ мм (рис.4).



Рис. 4. Макетные образцы трубной доски

Исходя из диапазона просвечиваемых толщин, контроль проводился по схеме 2д с напряжением на р/трубке в диапазоне 65-70 кВ; использовалась радиографическая плёнка D4 Agfa класса C3, упакованная в кольцевую кассету. Качество получаемых снимков оценивалось по проволочному титановому индикатору качества изображения IQI W13TI EN. Использование микрофокусной трубки позволяет проводить съемку при малом ($10 \div 15$ мм) расстоянии. Такая геометрия создает увеличение изображения в $1,25 \div 1,5$ раза. В связи с этим была проверена возможность применения пленки AA400 Kodak (класс пленки C5) со свинцовыми экранами 0,025 мм, поскольку время экспозиции сокращается, примерно, в 2 раза. На пленке AA400 выявляемость проволочных эталонов была не хуже, чем на пленке D4.

Первые полученные снимки, продемонстрировав правильность выбранного направления, определили основную задачу, от решения которой напрямую зависела радиографическая чувствительность контроля: сведение к минимуму вклада рассеянного излучения, падающего на плёнку и достигающего величины, соизмеримой с потоком прямого излучения.

Можно предположить, что большой вклад рассеянного излучения вызван тем, что при малом заглублении источника в канал трубы (малое фокусное расстояние) имеет место недостаточное ослабление рассеянного излучения, обычно

происходящее за счет многократного переотражения внутри канала.

Было разработано и запатентовано устройство для удаления этого рассеянного излучения. Применение этого устройства позволило практически полностью снять рассеянное излучение и добиться указанных ниже результатов.

По результатам просвечивания натуральных образцов установлено:

- чувствительность радиографического контроля, определённая по проволочному IQI, составляет: 0,08 мм - для трубы из титана $\varnothing 14 \times 1,5$ мм и 0,1 мм - для трубы из нержавеющей стали $\varnothing 20 \times 2,5$ мм;

- время экспозиции на пленку D4 для трубы $\varnothing 20 \times 2,5$ мм - 180 сек.

Снимки показаны на рис.5 и 6

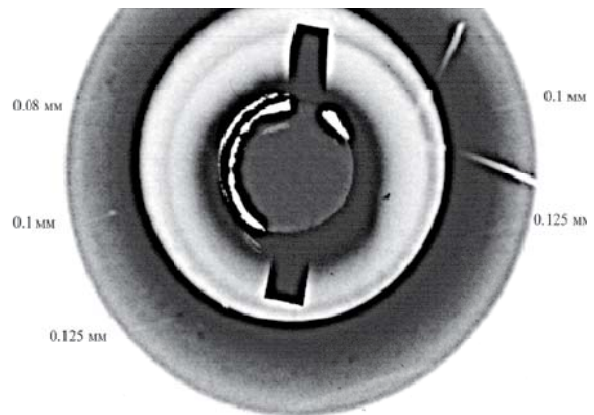


Рис. 5. Снимок ССТТД из титана: 70 кВ, 0,2 мА, плёнка C5, время экспозиции - 90

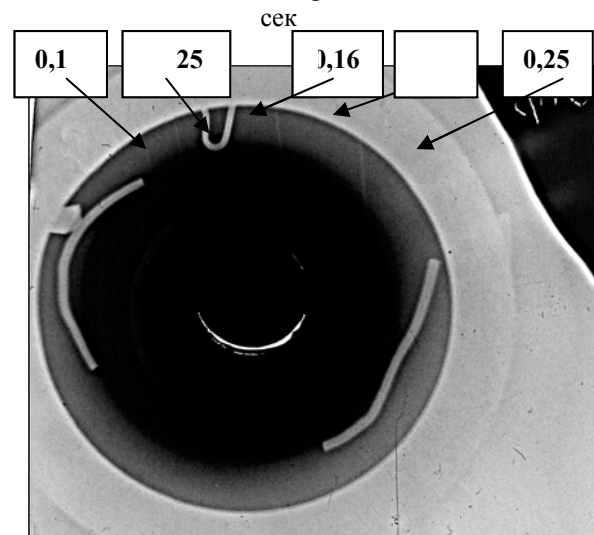


Рис. 6. Снимок ССТТД из нержавеющей стали. 105 кВ, пленка C3, время экспозиции 180 сек

При контроле макета ССТТД из нержавеющей стали с диаметром отверстия 12 мм был применен кольцевой пластинчатый тест толщиной 0,25 мм с

отверстиями от $\varnothing,25$ мм до $\varnothing,6$ мм. Этот тест был заглублен в деталь на 1,5 мм и сверху заподлицо закрыт шайбой из нержавеющей стали. Все отверстия были выявлены на снимке, т.е. чувствительность контроля соответствовала требованиям 1Т по коду ASME (рис. 7).

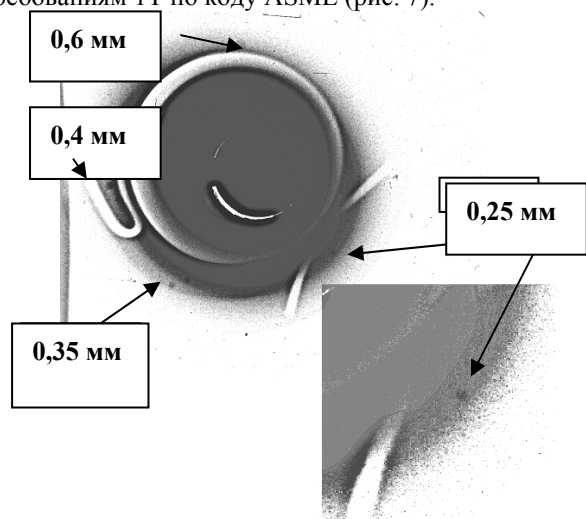


Рис. 7. Снимок макета ССТТД из нержавеющей стали с заглубленными «порами» 105 кВ, пленка С3, время экспозиции 180 сек

Во всех этих экспериментах анод вводился так, чтобы зона фокуса трубки была на глубине, равной диаметру канала.

Полагаем, что достигнутые на установке значения чувствительности радиографического контроля ССТТД могут использоваться в дальнейшем при оценке применения других систем детектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. ПНАЭГ-7-009-89 «Сварка и наплавка. Основные положения»
2. ПНАЭГ-7-017-89 «Унифицированная методика контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Радиографический контроль».
3. ПНАЭГ-7-010-89 «Сварные соединения и наплавки. Правила контроля»
4. U. Zscherpel и др. «A new fully digital system for RT inspection of metal tube to tube sheet joints of heat exchanger.» 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China
5. W. Zhao и др. «A method of X-ray digital imaging automatic Inspection on Tube to tube sheet welded joints Based on VC++», ibid.
6. K. Ding и др. « Digital Radiographic Imaging Inspection System on the Tube to Tube sheet Welding Joints of Heat Exchanger». Ibid.

3D ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ НАУЧНЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

Чугуй Ю.В.^{1,2,3}, Верхогляд А.Г.¹, Ступак М.Ф.^{1,2}, Поташников А.К.¹, Обидин Ю.В.¹

¹ Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской Академии наук (КТИ НП СО РАН), 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41
E-mail: chugui@tdisie.nsc.ru

² Новосибирский Государственный Университет (НГУ), 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

³ Новосибирский Государственный Технический Университет (НГТУ), 630092, Россия, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

Обеспечение на современном уровне перспективных научных исследований, а также решение актуальных проблем безопасности в атомной, железнодорожной, нефтяной и других отраслях промышленности требуют применения бесконтактных измерительных систем с микроразрешением и быстродействием от сотен до 10^5 изм/с [1]. В КТИ НП СО РАН разработан, реализован и испытан ряд новейших измерительных систем и технологий с использованием метода контроля на основе структурного освещения, низкокогерентного интерференционного метода, теневого и триангуляционного методов, а также методов рентгеновской панорамной томографии. Ниже приводятся технические решения систем, созданных в КТИ НП СО РАН.

3D оптические технологии для атомной промышленности

Для обеспечения 100% трехмерного (3D) контроля геометрических параметров дистанционирующих решеток российских атомных реакторов ВВЭР-1000 разработана и создана в КТИ НП лазерная измерительная машина (ЛИМ) с использованием структурного (многоточечного) освещения [2]. ЛИМ включает в себя трехканальную измерительную головку, ПЗС камеру и сканирующий X-Y стол (рис. 1). Машина позволяет за 12 – 15 минут измерять конфигурации всех отверстий ячеек и направляющих каналов дистанционирующих решеток, определять расстояния между ячейками и их габаритные размеры. Кроме того, с ее помощью можно измерять общие размеры «под ключ» дистанционирующих решеток и реконструировать профиль любой ячейки (рис. 2).

Для контроля дистанционирующих решеток широкой номенклатуры российского и западного дизайна в КТИ НП разработан универсальный метод измерений на основе структурного освещения с использованием дифракционных



Рис. 1. Лазерная измерительная машина для высокопроизводительного бесконтактного контроля дистанционирующих решеток

оптических элементов (ДОЭ). Обеспечение универсальности метода и требуемых метрологических характеристик измерительной системы достигается путем структурного освещения объекта волновым фронтом в виде узкого светового кольца, формируемого осесимметричным ДОЭ. С их помощью можно получать информацию как в одном, так и в нескольких сечениях ячейки по глубине. В последнем случае ДОЭ фокусирует лазерное излучение в систему колец равного диаметра,

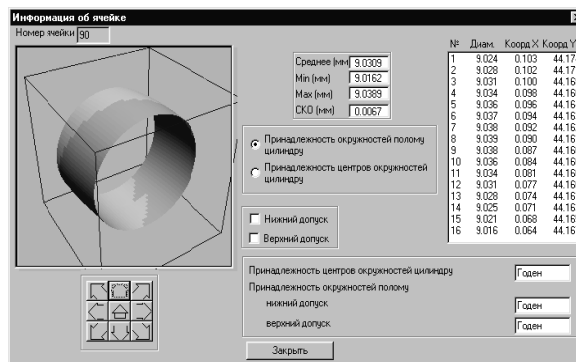


Рис. 2. Реконструированный с помощью ЛИМ профиль 3D ячейки (годная ячейка)

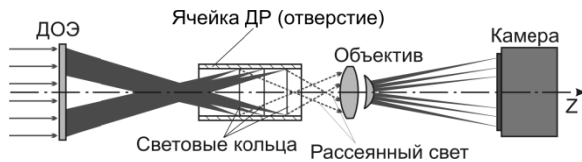


Рис. 3. Метод контроля дистанционирующих решеток на основе ДОЭ

расположенных вдоль оси Z ячейки с некоторым шагом (рис. 3), что позволяет получить 3D-модель ячейки. При таком структурном освещении не имеет принципиального значения количество и расположение выпуклостей (пуклевков) ячейки, фиксирующих ТВЭЛ. Другими словами, структура освещения позволяет проводить измерения по всей внутренней поверхности ячейки без необходимости механического перемещения во время измерения отдельной ячейки, что обеспечивает высокое быстродействие метода.

На основе предложенного метода разработана универсальная лазерная измерительная система для контроля дистанционирующих решеток [3].

Погрешность измерения диаметра вписанной окружности (отверстия ячейки) составила меньше 4 мкм, погрешность позиционирования центра ячейки – менее 12 мкм. Производительность машины – 5 изд./час, что в 300 раз превышает производительность у существующих координатно-измерительных машин.

Для решения задачи поверхностного контроля качества топлива в КТИ НП разработана система автоматической дефектоскопии уран-содержащих таблеток (система ДЕФЕКТ). Она предназначена для обнаружения и распознавания поверхностных дефектов топливных таблеток и их автоматической отбраковки (рис. 4). Метод измерений основан на формировании (путем специального освещения) высококонтрастных изображений поверхностей таблетки с последующим вводом их в компьютер с помощью матричных ПЗС фотоприемников и обработкой в реальном времени. На базе разработанных метода и программного обеспечения (совместно

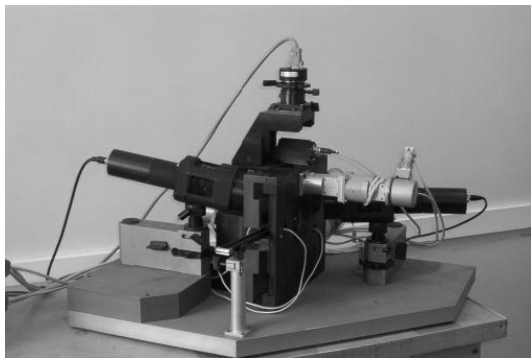


Рис. 4. Система ДЕФЕКТ для контроля уран-содержащих таблеток.

с Институтом математики СО РАН) впервые в мире создана система автоматической дефектоскопии урансодержащих таблеток с производительностью в темпе конвейера при минимальном размере обнаруживаемого дефекта 100 мкм и вероятностью обнаружения дефекта 95%. Созданы и исследованы опытный образец системы для контроля внешнего вида таблеток с производительностью 1 таб./с и измерительный блок для контроля боковой поверхности таблеток с производительностью до 10 таб./с.

В КТИ НП разработана и создана промышленная версия низкокогерентного профилометра ПРОФИЛЬ (рис. 5) для 3D контроля поверхности с разрешением в 1 мкм и глубиной до 10 мм. Система успешно применяется для поверхностного контроля топливных элементов в промышленных условиях в атомной промышленности [4].



Рис. 5. Промышленная версия низкокогерентного профилометра ПРОФИЛЬ

Для контроля топливных элементов ядерных реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-440 на основе теневых методов разработана оптико-электронная автоматическая измерительная система КОНТРОЛЬ [5].

Созданные приборы входят в состав технологических линий при производстве топливных элементов тепловыделяющих сборок для атомных реакторов.

Компьютерная панорамная томография промышленного применения

Внедрение методов томографии в промышленность сталкивается с проблемой разработки устойчивых высокоскоростных алгоритмов реконструкции и обработки томограмм. Для контроля сварных швов цилиндрических промышленных изделий предложено использовать панорамное представление внутренней структуры вместо традиционных поперечных сечений [6]. Разработан быстродействующий алгоритм локальной реконструкции тонкого приповерхностного слоя сварного шва трубчатых изделий. Выражение для реконструкции панорамы

можно получить, если в известном выражении для реконструкции методом свертки и обратного проецирования [7] перейти к полярным координатам ρ , θ ($x = \rho \cos \theta$, $y = \rho \sin \theta$). Тогда мы получим выражение для реконструкции в цилиндрических координатах:

$$f(\rho, \theta, z) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} d\varphi \int_{-\infty}^{+\infty} p(s, z, \varphi) h[\rho \cos(\theta - \varphi) - s] ds,$$

где $p(s, z, \varphi)$ – совокупность проекционных данных, $h[\rho \cos(\theta - \varphi) - s]$ – ядро свертки.

При фиксированном радиусе $\rho = R$ можно реконструировать цилиндрический слой соответствующего радиуса. Развертка такого слоя в виде прямоугольного двумерного изображения (панорамы) удобна как для визуального исследования, так и для автоматической обработки.

Созданный алгоритм восстанавливает высокочастотную составляющую томограммы, в которой локальные дефекты выделены согласованной фильтрацией. Особенностью разработанного алгоритма реконструкции является возможность объединения нескольких соседних слоев на одном изображении, что позволяет проводить локализацию и измерение всех дефектов на одном синтезированном изображении. Устойчивость алгоритма остается удовлетворительной в условиях недостаточной экспозиционной дозы и при реконструкции по сильно ограниченному проекциям.

Наряду с алгоритмами восстановления внутренней структуры сварного шва предложена и экспериментально проверена методика обнаружения и измерения сферических пустотелых пор по развертке изображения сварного шва. Эта задача решалась путем измерения суммарной яркости (B_{Σ}) изображения дефекта на изображении, которая при фиксированном ослаблении в дефекте является функцией от его объема V_d : $B_{\Sigma} = F(V_d)$ (калибровочная функция). Максимальная точность измерений достигнута при определении суммарной яркости внутри круга фиксированного радиуса, который согласован с граничной частотой фильтра, используемого при реконструкции. При этом объем дефекта определяется по его яркости через обратную функцию: $V_d = F^{-1}(B_{\Sigma})$.

Набор разработанных программных средств содержит модели канала регистрации промышленного томографа и включает в себя так называемую «сцену», содержащую модели источника излучения, объекта контроля и детектора рентгеновского излучения. Параметры всех элементов сцены задаются исследователем в интерактивном режиме. Моделирование

позволило не только создать и проверить новые быстродействующие и помехоустойчивые алгоритмы реконструкции, обнаружения и измерения дефектов сварного шва, но и сформировать требования к аппаратной части томографа. Были определены мощность и режимы работы рентгеновской трубки, оптимизированы расстояния между объектами сцены, сформулированы требования к разрешению и чувствительности детектора. Совокупность алгоритмических, программных и аппаратных решений позволила создать томографическую станцию, выполняющую полный контроль сварного шва ТВЭЛов за одну минуту [6]. Структурная схема томографической станции приведена на рис. 6.

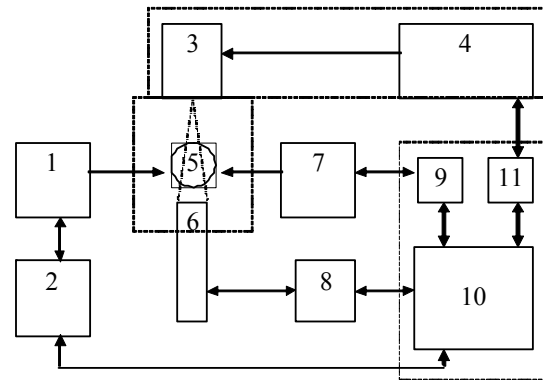


Рис. 6. Структура томографической станции. 1 – транспортный стол, 2 – контроллер стола, 3 – рентгеновская трубка, 4 – рентгеновский аппарат, 5 – твэл, 6 – блок детекторов, 7 – блок сканирования, 8 – адаптер видеокамеры, 9 – контроллер сканирующей системы, 10 – компьютер, 11 – модуль управления.

Разработаны алгоритмы реконструкции, обнаружения и измерения дефектов типа пор, позволяющие выполнять томографический контроль изделий в автоматическом режиме с высокой производительностью. Панорамные изображения цилиндрических слоев, полученные при помощи томографической станции, показаны на рис. 7.

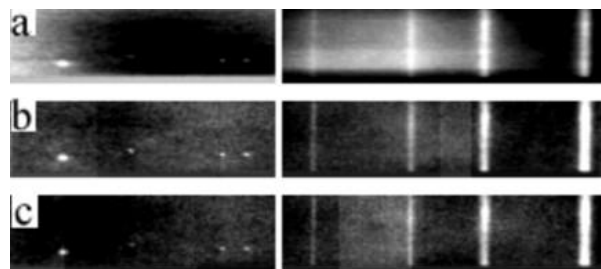


Рис. 7. Панорамные изображения трех цилиндрических слоев: 3.8 мм (a), 4.2 мм (b), 4.5 мм (c)

Томографическая станция сертифицирована в качестве средства измерения.

Система круглосуточного контроля смещений и деформаций элементов механических и инженерных конструкций

Как известно, добыча нефти и газа на шельфах осуществляется с помощью буровых платформ. Платформа является чрезвычайно массивным и инертным объектом. Для защиты платформы от возможных механических нагрузок, действующих на основание, используется четыре маятниковых подшипника скольжения (рис. 8). Они обеспечивают защиту платформы от сейсмических колебаний, движений льда, механических нагрузок при бурении, нагрузок, возникающих в связи с тепловым расширением и др. При прохождении пути в среднем равного 3 км подшипники изнашиваются. Однако, если в большинстве регионов земного шара подшипники

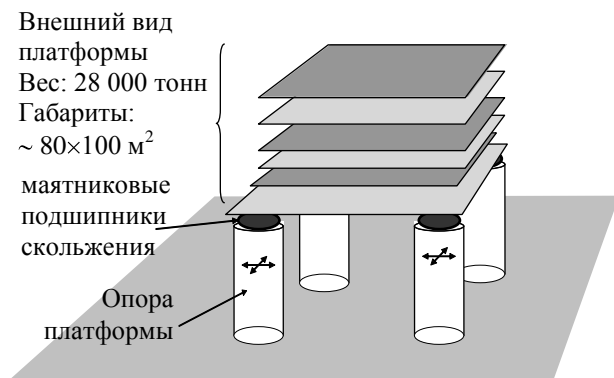


Рис. 8. Схема нефтяной платформы

проходят этот путь за время службы платформы (~30 лет), то для шельфа Сахалина, по расчетам специалистов, это время может быть от года до 10 лет, что гораздо меньше срока службы буровой платформы. Частая замена подшипников – очень трудоемкий и дорогостоящий процесс. С другой стороны, наличие изношенного подшипника представляет большую угрозу для эксплуатации платформы и окружающей среды.

В связи с этим, чрезвычайно важно отслеживать путь, пройденный подшипником. Для этой цели была создана автоматическая система [8] измерения смещения подшипников скольжения (рис. 9). Ее основное назначение – постоянное бесконтактное наблюдение положения подшипника и измерение пройденного подшипником пути за указанный интервал времени. Принцип измерения основан на измерении оптическим методом смещения подшипника относительно платформы.

Система рассчитана на круглосуточную в течение тридцати лет работу. Ее технические характеристики: диапазон измерений смещения по осям X и Y ± 350 мм с погрешностью ± 0.6 мм,

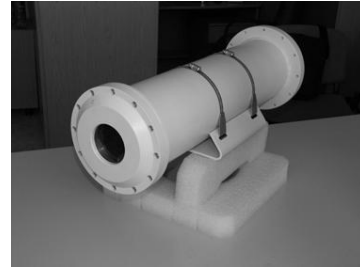


Рис. 9. Оптический измерительный блок системы контроля подшипников скольжения

скорость измерений более 10 измер./с, возможный диапазон скоростей перемещений без ухудшения точности до 4 м/с, рабочая температура для стойки управления от 0 до +40 °С, рабочая температура для блока оптоэлектронного и мишени от -39°С до +40°С.

Система прошла тестовые испытания и принята заказчиком в эксплуатацию. Без значительных доработок данная система может также использоваться для круглосуточного измерения смещений и деформаций различных элементов механических и инженерных конструкций и выдачи оповещений об опасности.

Лазерный диагностический контроль колесных пар на ходу поезда

Безопасность движущихся поездов обеспечивается регулярным контролем колес на обнаружение дефектов. Институтом разработан высокоскоростной лазерный бесконтактный метод контроля (рис. 10) геометрических параметров движущихся 3D объектов на основе триангуляционных PSD датчиков с быстродействием до 10⁵ измер./с [9].

В предельно сжатые сроки нами разработана и создана уникальная всепогодная система КОМПЛЕКС (рис. 11) для автоматического контроля геометрии колесных пар грузовых

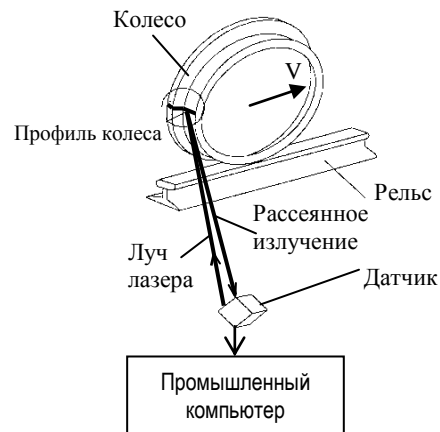


Рис. 10. Принцип действия системы контроля геометрических параметров колесных пар во время движения поезда



Рис. 11. Автоматическая лазерная система КОМПЛЕКС для бесконтактного контроля колесных пар на ходу поезда (Западно-Сибирская железная дорога, станция Барышево)

вагонов на ходу поезда (до 60 км/ч). Система предназначена для контроля более десятка геометрических параметров колесных пар вагонов с быстродействием до ста тысяч измерений в секунду. Она выгодно отличается от своих зарубежных аналогов по ценовым параметрам и функциональным характеристикам. Система КОМПЛЕКС работает в диапазоне температур от -50° до $+50^{\circ}$ С.

В основу технического решения при создании КОМПЛЕКСА положен принцип самосканирования колесной пары с использованием набора активных лазерных дальнометров (триангуляционного типа), при котором каждое из колес параллельно и независимо сканируется двумя измерительными датчиками – внутренним и наружным, установленными внутри рельсового пути и снаружи соответственно. При движении колесной пары каждый из датчиков измеряет текущее расстояние до поверхности колеса (вдоль заданного направления измерения). В итоге формируются сигналы, отражающие текущий профиль колесной пары в некотором сечении, угол и высота которого определяются направлениями измерения датчиков.

В настоящее время более 60 таких систем успешно эксплуатируются на 14 железных дорогах России (от Москвы до Дальнего Востока). Использование таких систем позволяет улучшить безопасность железнодорожного транспорта в России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chugui Yu.V., Plotnikov S.V., Potashnikov A.K., Verkhogliad A.G. Novel optical measuring systems and laser technologies for science and industry. Proc. SPIE, 2006, vol. 6280, pp. 628003-1 – 628003-10.

2. Битюцкий О.И., Вертопрахов В.В., Гущина А.А., Зарубин М.Г., Лавренюк П.И., Ладыгин В.И., Карлов Ю.К., Кучинский К.И., Пименов Ю.В., Плотников С.В., Рожков В.В., Чапаев И.Г., Чернышов В.М., Чугуй Ю.В., Юношев В.П. Трехмерный бесконтактный контроль геометрических параметров дистанционирующих решеток ядерных реакторов // *Автометрия*. – 2003. – Т. 39, № 5. – С. 4-18.

3. Завьялов П.С., Лемешко Ю.А., Финогенов Л.В., Чугуй Ю.В. Трехмерный контроль дистанционирующих решеток тепловыделяющих сборок атомных реакторов на основе дифракционных оптических элементов // *Автометрия*. – 2008. – Т.44, № 2. – С. 23-31.

4. Сысоев Е.В., Голубев И.В., Чугуй Ю.В., Шахматов В.А. Измерение локальных отклонений профиля поверхности на основе интерференции частично когерентного света // *Автометрия*. – 2004. – Т. 40, № 5. – С. 4-13.

5. Белоглазова В.А., Битюцкий О.И., Гущина А.А., Карлов Ю.К., Кривенков Б.Е., Лавренюк П.И., Ладыгин В.И., Несин В.И., Пастушенко А.И., Петров А.Н., Пименов Ю.В., Рожков В.В., Чапаев И.Г., Чернышев В.М., Чугуй Ю.В., Юношев В.П., Юношев С.П. Оптико-электронное устройство бесконтактного контроля геометрических параметров ТВЭЛ // *Автометрия*. – 2004. – Т. 40, № 2. – С. 82-92.

6. Жуков Ю.А., Карлов Ю.К., Обидин Ю.В., Петухов К.В., Поташников А.К., Сартаков Ю.В., Чащин С.Б. Компьютерная панорамная томография промышленного применения // *Дефектоскопия*. – 2008. – № 9. – С. 27-37.

7. Троицкий И.Н. Статистическая теория томографии. – М.: Радио и связь, 1989, стр. 22.

8. Базин В.С., Верхогляд А.Г., Савков С.Г., Каличкин С.В., Каликин В.Э., Макаров С.Н., Чугуй Ю.В. Оптико-электронная система измерения смещений и деформаций элементов механических и инженерных конструкций для нефтегазовых платформ // *Приборы*. – 2006. – № 12. – С. 15-19.

9. Байбаков А.Н., Гуренко В.М., Патерикин В.И., Юношев С.П., Плотников С.В., Сотников В.В., Чугуй Ю.В. Автоматический контроль геометрических параметров колесных пар во время движения поезда. *Автометрия*, 2004, Т. 40, № 5, С. 94-103.

РАДИОТОМОГРАФИЯ ФОРМЫ НЕПРОЗРАЧНЫХ ОБЪЕКТОВ

Якубов В.П., Шипилов С.Э., Суханов Д.Я.

Томский государственный университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36

E-mail: yvlp@mail.tsu.ru

Как известно, слово «томография» происходит от двух греческих слов $\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$ – слой и $\gamma\rho\alpha\phi\omicron\varsigma$ – пишу. Таким образом, томография буквально означает «писать слой» – то есть послойное исследование структуры объектов. В настоящее время под томографией понимают технологию, позволяющую по результатам зондирования какого-либо объекта восстанавливать его внутреннюю структуру. Томография имеет различные виды в зависимости от используемого излучения. Широко известны такие её виды как рентгеновская томография, ЯМР-томография, позитронная и ультразвуковая томографии и др. Последние годы значительный интерес исследователей вызывает радиоволновая томография и, прежде всего, так называемая микроволновая томография, включая ее такое важное обобщение, как сверхширокополосная (СШП) томография.

Широкое практическое использование СШП томографии пока еще ограничивается, с одной стороны, значительными техническими трудностями создания и приема СШП излучения и, с другой стороны, сложностью описания и интерпретации одновременно проявляющихся физических явлений взаимодействия излучения с веществом. К таким явлениям относятся многократное рассеяние, дифракция, интерференция и поглощение волн в сверхширокой полосе частот на произвольно расположенных и хаотически ориентированных малых и больших неоднородностях среды. Многообразие сочетаний этих эффектов затрудняет решение прямой задачи – описания возникающих интегральных эффектов возмущения волн. Тем не менее, следует заметить, что прямые задачи, при всей их сложности решает сама природа, поскольку волны, так или иначе, достигают точек наблюдения. Решению обратной задачи – восстановлению распределения неоднородностей среды в исследуемом объеме – при этом становится вообще проблематичным. Обратные задачи вынуждены решать самим исследователям. Эти задачи, как правило, относятся к разряду некорректных, требующих использования регуляризирующих алгоритмов. Наиболее устойчивыми являются самые простые из них, максимальным образом учитывающие доминирующие механизмы взаимодействия волн со средами распространения и позволяющие подчеркнуть (выделить) эти механизмы. Для приложений, например, для зондирования оптически непрозрачных сред, именно обратные задачи наиболее важны. В случае, если радиоизлучение проникает внутрь такой среды, то можно говорить о восстановлении её внутренней

структуры по прошедшему или рассеянному полю. Эта структура заключается в пространственном распределении значений диэлектрической проницаемости. Резкие градиенты изменения этой проницаемости характерны для границ раздела сред или погруженных в них объектов. Типичный пример – поиск скрытых в земле археологических захоронений, инженерных коммуникаций или противопехотных мин. Сюда же примыкают задачи обнаружения и идентификации запрещенных предметов в багаже и ручной клади. Такого сорта задачи хотя и не являются простыми, но для них разработан целый ряд эффективных решений основанных на использовании явления фокусировки излучения [1]. Если речь идет о радионепрозрачном объекте, то излучение внутрь его практически не проникает, и решение обратной задачи сводится, прежде всего, к восстановлению его формы на основе анализа рассеянного (отраженного) излучения.

Поясним постановку задачи томографии радионепрозрачных объектов. В рамках приближения Кирхгофа локационное поле, рассеянное неровной поверхностью S идеально проводящего тела, представляется как [2]:

$$E(\mathbf{r}_0, f) = -2 \iint_S G_0(\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_s, f) \frac{d}{dn} G_0(\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_s, f) dS$$

где $G_0(\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_s, f)$ – функция Грина для среды погружения на частоте f . Здесь для простоты предполагается, что точка излучения и приема совпадают: $\mathbf{r}_0 = (\mathbf{r}_0, h)$ (рис. 1).

Последний интеграл можно переписать в виде

$$E(\mathbf{r}_0, f) = - \iint_S \frac{d}{dn} G_0^2(\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_s, f) dS. \quad (1)$$

Если теперь ввести функцию, описывающую видимую сверху форму отражающей поверхности $z = Z_s(\mathbf{r})$, то поверхностный интеграл в (1) для рассеянного поля может быть трансформирован в объемный:

$$E(\mathbf{r}_0, f) = - \iiint_{V_1} \delta(z_1 - Z_s(\mathbf{r}_1)) (\mathbf{N}\nabla) G_0^2(\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_1, f) d^2\mathbf{r}_1 dz_1$$

где вектор $\mathbf{N} \equiv (-\nabla_{\perp} Z_s(\mathbf{r}_1), 1)$ описывает направление нормали к поверхности S .

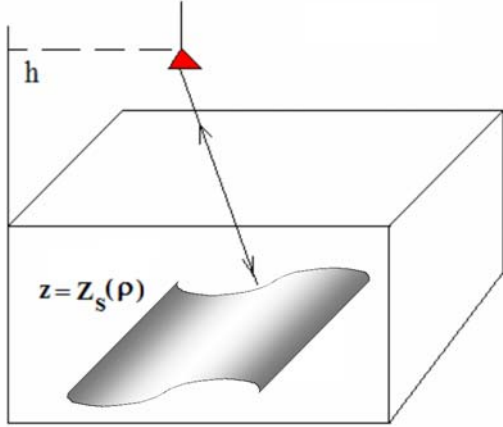


Рис. 1. Геометрия зондирования

Введем характеристическую функцию зондируемого непрозрачного объекта, которая равна 1 внутри объекта и 0 вне него:

$$U(\mathbf{r}) \equiv \begin{cases} 1, & \mathbf{r} \in V_1 \\ 0, & \mathbf{r} \notin V_1. \end{cases}$$

При зондировании сверху в качестве этой функции можно использовать ступенчатую функцию Хевисайда: $U(\mathbf{r}) \equiv \chi(Z_s(\boldsymbol{\rho}) - z)$. В этом случае, заметив, что

$$\delta(z - Z_s(\boldsymbol{\rho}))\mathbf{N} = -\nabla\chi(Z_s(\boldsymbol{\rho}) - z) = -\nabla U(\mathbf{r}),$$

полученный выше объемный интеграл может быть переписан как

$$E(\boldsymbol{\rho}_0, f) = \iiint_{V_1} (\nabla U(\mathbf{r}_1) \nabla) G_0^2(\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_1, f) d^2 \boldsymbol{\rho}_1 dz_1,$$

и далее с использованием интегральной теоремы о градиенте имеем

$$E(\boldsymbol{\rho}_0, f) = -\iiint_{V_1} U(\mathbf{r}_1) \Delta G_0^2(\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_1, f) d^2 \boldsymbol{\rho}_1 dz_1.$$

В случае достаточно высокочастотных сигналов допустима замена:

$$E(\boldsymbol{\rho}_0, f) \approx k^2 \iiint_{V_1} U(\mathbf{r}_1) G_0^2(\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_1, f) d^2 \boldsymbol{\rho}_1 dz_1,$$

где $k = 2\pi f/c$ - волновое число. Это соотношение подобно приближению Борна в теории рассеяния волн объемными неоднородностями, но в качестве неизвестной функции здесь выступает характеристическая функция $U(\mathbf{r})$, которая и описывает форму непрозрачного объекта.

Для восстановления характеристической функции $U(\mathbf{r})$ можно воспользоваться процедурой фокусировки в поперечной плоскости:

$$F(\boldsymbol{\rho}_F, f) = \iint_S E(\boldsymbol{\rho}_0, f) M(\boldsymbol{\rho}_F - \boldsymbol{\rho}_0, f) d^2 \boldsymbol{\rho}_0,$$

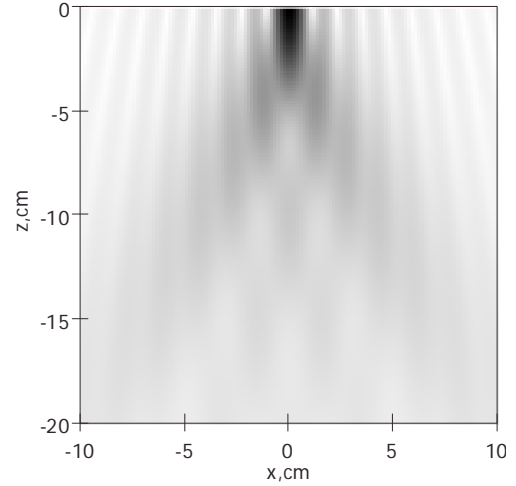


Рис. 2. Аппаратная функция системы

где, как и раньше, $M(\boldsymbol{\rho}, f) = \exp\{-2ik\sqrt{\boldsymbol{\rho}^2 + h^2}\}$ - функция, фокусирующая излучение на некоторую пробную плоскость, параллельную плоскости излучения-приема и отстоящую от неё на расстоянии h (рис. 1). Предполагается, что в результате измерений на частоте f получено распределение рассеянного поля $E(\boldsymbol{\rho}_0, f)$ на некоторой плоскости вне объема V_1 . Как известно, операция фокусировки заключается в синфазном сложении комплексных амплитуд рассеянного поля в выбранной точке фокусировки. Для обеспечения такого сложения необходимо компенсировать фазовые набеги от передающей антенны до точки фокусировки и от точки фокусировки до приемной антенны. Функция $M(\boldsymbol{\rho}, f)$ обеспечивает эту операцию. Сфокусированное поле можно переписать так:

$$F(\boldsymbol{\rho}_F, f) = \iiint_{V_1} U(\boldsymbol{\rho}_1, z_1) Q(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_F, z_1, f) d\mathbf{r}_1, \quad (2)$$

где

$$Q(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_F, z_1, f) = k^2 \iint_S G^2(\boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}_0, z_1) M(\boldsymbol{\rho}_F - \boldsymbol{\rho}_0, f) d\boldsymbol{\rho}_0$$

- является откликом системы на точечный отражатель, расположенный в точке \mathbf{r}_1 , т.е. это аппаратная функция системы (АФС) на частоте f при фокусировке в точку $\boldsymbol{\rho}_F$, лежащую на поверхности.

Заметим, что в случае большой апертуры S интеграл (2) трансформируется в интеграл типа свертки, и тогда приближенно

$$Q(\boldsymbol{\rho}_1, \boldsymbol{\rho}_F, z_1, f) \approx Q(\boldsymbol{\rho}_F - \boldsymbol{\rho}_1, z_1, f).$$

Это упрощение позволяет приближенно применить аппаратную функцию для одной точки фокусировки и для других точек. Важным является только значение расстояния $\boldsymbol{\rho} \equiv \boldsymbol{\rho}_F - \boldsymbol{\rho}_1$. Результат численного расчета аппаратной

функции $Q(\rho, z, f)$ для свободного пространства (показатель преломления $n=1$) на частоте $f = 10$ ГГц при размере синтезируемой апертуры 50 см и её высоте $h=30$ см представлен на рис. 2. Наибольшим значениям амплитуды здесь соответствуют более темные участки изображения.

Важно подчеркнуть, что проводимая фокусировка должна обеспечить локализацию неоднородностей только в горизонтальной плоскости, а фокусировка в вертикальном направлении на этом этапе не должна достигаться. Учитывая большую протяженность аппаратной функции в вертикальном направлении, функция Грина существенно упрощается:

$$G(\rho, z) \approx \exp(ikz)G_{\perp}(\rho),$$

$$G_{\perp}(\rho) \equiv G(\rho, z=0).$$

С учетом этого упрощения для (2) можно записать

$$F(\rho_F, f) \approx \gamma(\rho_F, f) \int_{-\infty}^{Z_s(\rho_F)} \exp\{i2kz\} dz =$$

$$= \frac{\gamma(\rho_F, f)}{2ik} \exp\{i2kZ_s(\rho_F)\},$$

(3)

где весовой множитель определяется как

$$\gamma(\rho_F, f) \equiv$$

$$\equiv k^2 \iint_S M(\rho_F - \rho_0, f) G_{\perp}^2(\rho_1 - \rho_0, f) d^2\rho_0 d^2\rho_1.$$

При получении этой формулы использовано, что при достаточной площади наблюдения получается высокая локализация излучения в виде узкой (в поперечном направлении), но вытянутой (в продольном направлении) области.

Учет того факта, что внутри зондируемого объекта характеристическая функция равна $U(\mathbf{r}_1) \equiv 1$, позволяет непосредственно из (3) определить форму непрозрачного объекта. Для этого достаточно провести нормировку, например, на значение в центре изображения:

$$\frac{F(\rho_F, f)}{F(0, f)} = \frac{\gamma(\rho_F, f)}{\gamma(0, f)} \exp\{i2k[Z_s(\rho_F) - Z_s(0)]\} \approx$$

$$\approx \exp\{i2k[Z_s(\rho_F) - Z_s(0)]\}.$$

Форма объекта восстанавливается с помощью соотношения

$$[Z_s(\rho_F) - Z_s(0)] = \frac{1}{2k} \arg\left(\frac{F(\rho_F, f)}{F(0, f)}\right). \quad (4)$$

На рис. 3 показан пример численного моделирования по использованию этой процедуры для восстановления формы полотна параболической зеркальной антенны с небольшим возмущением (искривлением). Частота излучения задавалась равной 1 ГГц, а диаметр антенны - 5 м.

Точность восстановления тем выше, чем выше частота используемого излучения.

Примечательным для предложенных технологий является возможность их реализации с использованием быстрых численных алгоритмов. Здесь важно отметить, что при вычислении (4) возможно появление локальных фазовых скачков на целое число 2π . Эти скачки легко устраняются с учетом непрерывности поверхности зондируемого тела.

Описанная процедура применима для монохроматического излучения, но использование СШП сигнала позволит повысить однозначность восстановления формы объекта, а также его положение в пространстве. Достаточно лишь осуществить временную фокусировку по глубине. Длительность импульса определяет разрешение по глубине залегания неоднородности [1].

Был проведён эксперимент по обнаружению металлического объекта в стене из строительного пенобетона. На рис. 4 представлена фотография экспериментальной установки и форма тестового объекта. Между двумя блоками пенобетона толщиной 10 см размещался плоский металлический объект ступенчатой формы. Сканирование производилось на площади 84x86 см. Пенобетонные блоки и объект располагались на расстоянии 80 см.

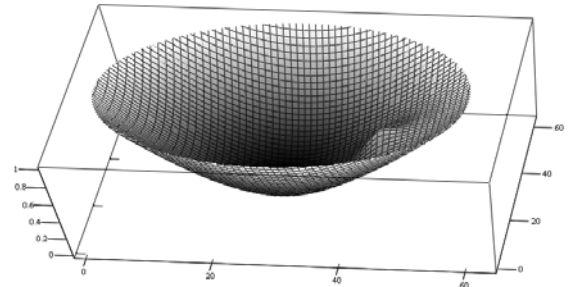


Рис. 3. Восстановленная форма параболической антенны с дефектом

На рис. 5 представлен результат восстановления томограммы прозрачного и непрозрачного объектов. Объекты отчётливо различаются при использовании импульсов длительностью 200 пс.

Таким образом, использование СШП излучения позволяет эффективно реализовать пространственно-временную локализацию взаимодействия излучения с веществом и на этой основе решать задачу радиоволновой томографии как в случае полупрозрачных, так и в случае непрозрачных объектов. В настоящее время область практического применения нестационарных полей постоянно расширяется.

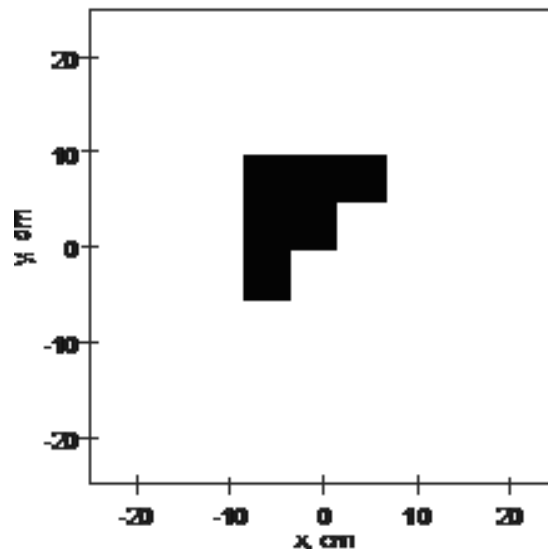


Рис. 4. Эксперимент по обнаружению тонкого металлического объекта в стене из пенобетона

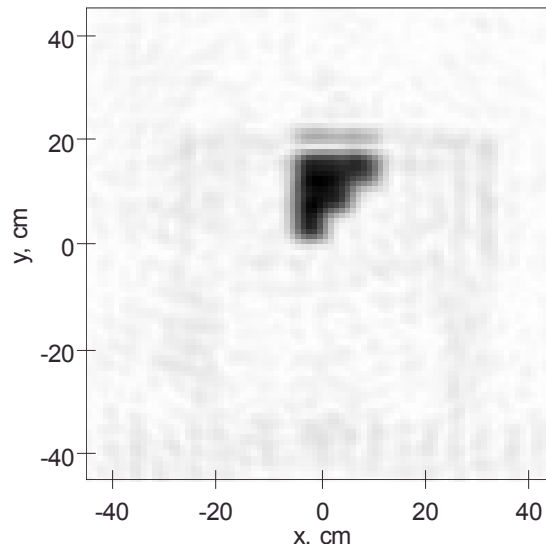
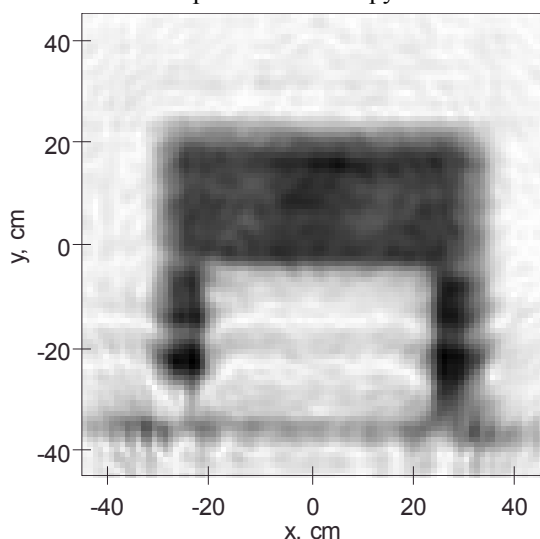


Рис. 5. Восстановленное изображение полупрозрачного и непрозрачного объектов

Работа выполнена при поддержке Российских программ АБЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» мероприятие 2, проект № 2.1.2/12874, а также ФЦП в рамках мероприятий 1.1. (ГК № 14.740.11.0076), 1.2.2 (НК-104П/2) и 1.3.1 (НК-181П/6).

ЛИТЕРАТУРА

1. Якубов В.П., Склярчик К.Г., Пинчук Р.В., Суханов Д.Я. и др. Радиоволновая томография скрытых объектов для систем безопасности // Известия высших учебных заведений. Физика. 2008, № 10. - Томск: ТГУ, - С. 53-60.
2. Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ СИСТЕМ ЦИФРОВОЙ РАДИОГРАФИИ

Толбанов О.П.

Томский государственный университет, 634050, Томск, пр. Ленина, 36

В работе представлены результаты разработки полупроводникового материала и структур для регистрации единичных квантов рентгеновского и гамма излучений и заряженных частиц высоких энергий. Созданы многоэлементные координатные детекторы нового поколения для высокоэффективных цифровых рентгеновских систем различного назначения, в том числе для неразрушающего контроля.

Введение

В настоящее время в мире активно используются системы рентгеновского контроля (СРК) для досмотра крупногабаритных грузов, багажа и ручной клади в аэропортах и других местах, где проблемы безопасности наиболее актуальны. Эффективность СРК данной направленности обеспечивается использованием высокоинтенсивных источников рентгеновского и тормозного излучения и скантillationными детекторами (CCD). Такие системы хорошо обеспечивают выявление высококонтрастных объектов, различающихся значительно по своей плотности, но низко-контрастные объекты идентифицируются плохо и метод не применим для досмотра людей.

Следует заметить, что CCD детекторы используются для построения СРК вот уже более 30 лет и давно исчерпали свои возможности. Создание оригинальных систем «технического зрения» нового поколения, которые были бы абсолютно безопасны для людей и других биологических объектов, а с другой стороны весьма информативны и не позволяли бы пронести оружие, горючие, токсичные, взрывоопасные и другие запрещённые предметы на объекты государственной важности, является актуальнейшей технической задачей безопасности и противодействия терроризму. Решение этой задачи связано с разработкой твердотельных детекторов прямого счёта единичных квантов рентгеновского и гамма излучений.

Современные детекторы гамма-излучения

Решение задач освоения ультра видимого диапазона спектра тесно связано с развитием технических средств для регистрации характеристик ионизирующего излучения. С момента открытия ионизирующих ($\alpha, \beta, \gamma, \chi$) лучей встал вопрос об инструментах, способных обнаружить и идентифицировать единичные кванты излучения и определить их энергию и координаты. По аналогии с радиофизикой такие одиночные детекторы в сравнении с вакуумными и скантillationными аналогами обладают наибольшими быстродействием и координатным

технические средства стали называться детекторами. Актуальность и масштабность данного направления работ не вызывают сомнений; разработка детекторов ионизирующих излучений всегда сдерживала развитие экспериментальной физики ядра. Важность создания новых типов детекторов подтверждена тем, что за прошедшее столетие разработано более десятка различных типов детекторов. За разработку трёх из них (камеру Вильсона, пузырьковую камеру, ионизационную камеру), были присуждены Нобелевские премии [1].

С семидесятых годов прошлого столетия для изготовления детекторов активно используются полупроводниковые материалы. Современная экспериментальная физика высоких энергий уже не может обойтись без полупроводниковых детекторов. Масштаб использования полупроводниковых детекторов в физике высоких энергий можно продемонстрировать на примере международного проекта ATLAS at LHC (CERN, Швейцария) стоимостью более 500 млн. долларов США. Только в одном этом проекте пиксельные детекторы занимают площадь более 2 м² и содержат 140 миллионов чувствительных элементов (пикселей), а микрополосковые детекторы покрывают площадь более 60 м² и содержат более 6 миллионов полосковых элементов [2]. Столь масштабное использование твердотельных детекторов породило соответствующее научное направление в физике полупроводников. Развитие этого направления пережило 3 этапа. В начале 70-х – были созданы первые полупроводниковые детекторы, в которых использованы Si и Ge, компенсированные литием. В конце 80-х – были созданы спектрометрические детекторы на основе чистых материалов, Si и Ge. Менее десяти лет назад стартовал новый этап в создании детекторов на основе сложных полупроводниковых соединений. Наиболее популярными из бинарных и тройных соединений в настоящее время являются такие полупроводники как GaAs, CdTe, CdZnTe. Два последних следует отнести скорее к перспективным материалам из-за высокой стоимости и отсутствия массовой технологии данных соединений [3].

Повышенный интерес к полупроводниковым детекторам на протяжении вот уже более 30 лет обусловлен их высоким энергетическим разрешением. Кроме того, полупроводниковым разрешением. Это обстоятельство позволило расширить области применения детекторов на основе полупроводников сложного состава, и в

первую очередь арсенида галлия. Наиболее перспективно применение многоэлементных детекторов для создания:

- малодозовых медицинских цифровых томографов, маммографов, дентальных аппаратов, систем диагностики раковых опухолей, рентгенодиагностики заболеваний костей;
- дефектоскопов и ламинографов с высоким пространственным разрешением до 0,02 мм;
- высокоэффективных систем таможенного досмотра и систем контроля перемещения опасных грузов;
- малодозовых систем безопасности в аэропортах, вокзалах, на транспортных магистралях, способных снизить вероятность террористических акций в местах большого скопления людей.

Работы, выполняемые в Томске по детекторной тематике, направлены на решение именно этих задач и включают проведение исследований по следующим направлениям:

- моделирование и экспериментальное исследование транспорта и сбора неравновесных носителей заряда из ионизационных α, β, γ -треков в микрополосковых и пиксельных детекторных структурах;
- технология детекторного материала и структур (GaAs и родственных соединений), включающая компенсацию примесями с глубокими уровнями в процессе диффузии, газофазовой и жидкофазовой эпитаксии;
- исследование электрофизических, фотоэлектрических и импульсных характеристик детекторных материалов, структур и детекторов;
- разработка различных конструкций и технологий квантово-чувствительных детекторов $\alpha, \beta, \gamma, \chi$, а также нейтронного и ионного излучений;
- разработка и изготовление микрополосковых и пиксельных координатных детекторов и детекторов изображений в рентгеновских и гамма лучах нового поколения;
- разработка, изготовление и сборка модулей цифрового изображения для цифровых информационных и диагностических систем различного назначения;
- разработка цифровой рентгенографической аппаратуры технического и медицинского назначения на основе квантово-чувствительных детекторов и модулей цифрового изображения.

В данной статье представлено краткое содержание основных направлений работ по детекторной тематике, исследования по которым ведутся Томскими учёными.

Детекторные материалы и структуры

Нами разработана технология компенсации слоёв GaAs электронного типа проводимости в процессе диффузии глубокой акцепторной примеси Cr [4, и др.]. Технология позволяет

управлять процессами растворения и диффузии глубокой компенсирующей примеси. Для этого нами используется легированный оловом GaAs с концентрации электронов: $n \cong N_d$. При введении атомов Cr с концентрацией: $N_{Cr} > N_d > N_f$, где N_f - суммарная концентрация собственных дефектов и фоновых примесей, GaAs перекомпенсируется в i -тип проводимости. Диффузия глубокой примеси Cr осуществляется при высоких температурах, поэтому процессы компенсации идут одновременно с перестройкой собственных дефектов кристалла. Как результат, достигается высокая степень компенсации глубокими центрами, уровень Ферми занимает предельное положение в объёме, F_{lim} [5], и значение удельного сопротивления (ρ) достигает своего максимального значения [5]:

$$\rho_i \cong \rho_{max} = 1/2e \cdot \sqrt{\mu_n \cdot \mu_p} \cdot n_i, \text{ где } n_i -$$

собственная концентрация. Экспериментальные значения удельного сопротивления структур составляют $\geq 1 \cdot 10^9$ Ом-см, что более чем на порядок превышает сопротивление структур на основе LEC SI-GaAs. Это обуславливает переход от структур барьерного типа, к структурам резистивного типа. К таким структурам формируются омические контакты, что способствует однородному распределению $\xi(x)$ по всей толщине структуры, поэтому $d(\xi) \cong d_o$, где $d(\xi)$ - толщина чувствительного слоя. Вольтамперные характеристики (ВАХ) резистивных структур линейны и симметричны вплоть до значений напряжённости электрического поля, соответствующих максимуму дрейфовых скоростей. Плотность протекающего в структуре тока при рабочем напряжении смещения не превышает 10^{-8} А/мм².

Полный сбор неравновесных носителей заряда из трека соответствует условию:

$$L_{a_n} = \tau_n \cdot v_n(\xi) > d(\xi), \quad L_{a_p} = \tau_p \cdot v_p(\xi) > d(\xi) \quad \text{В}$$

чувствительном слое. В компенсированных структурах дрейфовая длина носителей заряда существенно возрастает, что подтверждается нашими экспериментальными данными. Важнейшим отличием наших структур от традиционных LEC SI-GaAs [6] является однородное распределение $\xi(x)$ и отсутствие токовых осцилляций.

Формирование импульсов тока в квантово-чувствительных детекторах исследовалось нами экспериментально и сопоставлялось с расчётными данными при воздействии гамма излучения с энергией квантов 60 кэВ от источника ²⁴¹Am. Низкоэнергетичная компонента гамма излучения с энергией 14 кэВ отсекалась фильтром из GaAs толщиной 300 мкм. Исследовались зависимости вида амплитудного спектра и CCE от напряжения смещения при поглощении единичных γ -квантов

в чувствительном слое детектора. Моделирование проводилось на основе выражения для распределения интенсивности событий по энергиям, (dN / dE) [7]:

$$\frac{dN}{dE} = \int_0^d \frac{\alpha \cdot \exp^{-\alpha \cdot x}}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_{\Sigma}(x)(1 - \exp^{-\alpha \cdot d})} \cdot \exp\left(\frac{-(E - E_{\gamma 0} \cdot \eta(x))^2}{2 \cdot \sigma_{\Sigma}^2(x)}\right) dx$$

(1), где $\alpha \approx 10.983$ - коэффициент поглощения рентгеновского излучения с энергией $E_{\gamma 0} = 60$ кэВ в GaAs, $\eta(x)$ - функция Хехта, в случае плоской геометрии детектора и в отсутствии вторичного выброса носителей заряда, при линейных размерах γ -трека значительно меньших d_0 и без учета первоначальных потерь в треке имеет вид (4). Среднеквадратичное отклонение амплитуды собранного заряда в случае независимости компонент шума имеет вид: $\sigma_{\Sigma}^2(x) = \sigma_{st}^2 + \sigma_{el}^2 + \sigma_{col}^2(x)$, где σ_{st} - статистическая флуктуация образования электронно-дырочных пар, σ_{el} - флуктуации, связанные с шумами электроники, $\sigma_{col}(x)$ - флуктуации, обусловленные неполным сбором заряда в зависимости от точки генерации. Расчетные, согласно (1), амплитудные спектры для моноэнергетической линии $E_{\gamma 0} = 60$ кэВ изотопа ^{241}Am при различном напряжении смещения на детекторе (рисунок 1а) совпадают с экспериментальными спектрами (рисунок 1б). В амплитудном спектре отсутствует четко выраженная моноэнергетическая линия и наблюдается достаточно протяженный участок в области малых каналов АЦП. Анализ физических процессов позволяет сделать вывод о том, что подобный вид амплитудного спектра обусловлен неоднородным поглощением γ - излучения в образце при условии $L_p \ll d_0$. Максимум амплитудного спектра будут определять события,

соответствующие поглощению γ - квантов у катода в точке с координатой $x \rightarrow 0$, где интенсивность γ - излучения максимальна.

При увеличении напряжения смещения возрастает дрейфовая длина электронов, что приводит к смещению максимума амплитудного спектра в направлении к $E_{\gamma 0}$ и уменьшению его по абсолютной величине. Примечательно, что площадь (S) под кривой амплитудного спектра, определяемая выражением: $S = \int_0^{\infty} \frac{dN}{dE} dE$, выше

некоторого значения U перестаёт зависеть от напряжения смещения. Этот факт в совокупности с высоким значением SCE позволяет утверждать, что всё межэлектродное пространство детектора (d) является активной областью (d_0), $d \rightarrow d_0$, что характерно для резистивных структур.

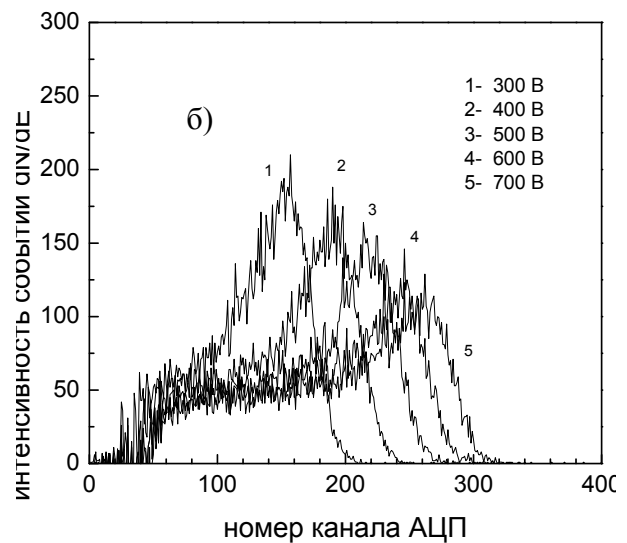
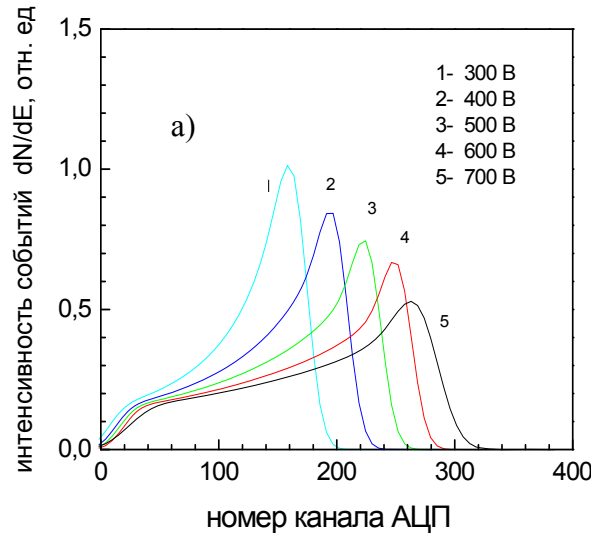


Рис. 1. Расчётные (а) и экспериментальные (б) амплитудные спектры квантово-чувствительных детекторов на основе SI-GaAs(Cr) структур при различных значениях напряжения смещения на детекторе, В: 1-300, 2-400, 3-500, 4-600, 5-700

Детекторы на основе компенсированного GaAs

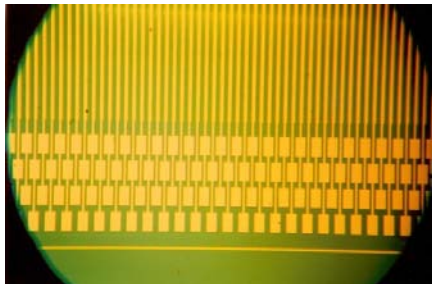
Созданные нами GaAs структуры были использованы для изготовления квантово-чувствительных микрополосковых и пиксельных детекторов. Все многоэлементные детекторы были изготовлены по технологии интегральных схем и представляют собой, по существу, большую интегральную схему, в которой единичные элементы - суть детекторы. Моделирование и расчёты показали, что, при выполнении условия, когда наименьший размер элемента становится меньше толщины чувствительного слоя, заряд пакета неравновесных носителей в точечном треке по мере дрейфа к аноду наводит импульс тока, амплитуда которого изменяется $\sim r^{-2}$, где r - расстояние от движущегося пакета до анода. При

регистрации минимально ионизирующих частиц наблюдается нелинейность экспериментальных зависимостей $CCE(U)$ с выходом на насыщение при $\xi \geq 1$ кВ/см. Значение CCE в максимуме зависит от толщины высокоомного слоя структуры и снижается от $\eta \approx 100\%$ при $d_o \approx 0,4$ мм до $\eta \approx 65\%$ при $d_o \approx 1,5$ мм. Анализ временных характеристик импульсов наведённого тока показывает, что из трека собирается практически 100% электронов, а дырки частично захватываются на глубокие отрицательно заряженные центры Ст.

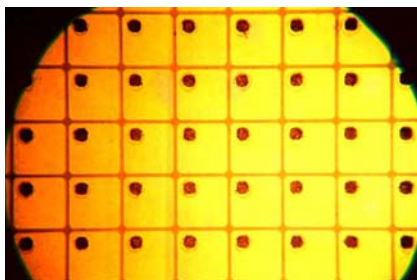
Конструкция структуры разрабатываемых детекторов, выбиралась из условия оптимальной величины эффективности регистрации. Например, для сканирующих детекторных линеек при заданной апертуре единичного элемента детектора (S_a) и времени сканирования единичной строки (t_c) эффективная глубина поглощения излучения, d_n равна:

$$\alpha(E) \cdot d_n \geq \ln \left(\frac{I_o \cdot S_a \cdot t_c}{I_o \cdot S_a \cdot t_c - N_o} \right) \cong 0,9 \cdot$$

Топология некоторых типов разработанных нами и изготовленных по интегральной технологии микрополосковых, пиксельных и сканирующих детекторов на основе SI-GaAs(Cr) структур, показаны на фотоснимках 2.



а) микрополосковый детектор



б) пиксельный детектор

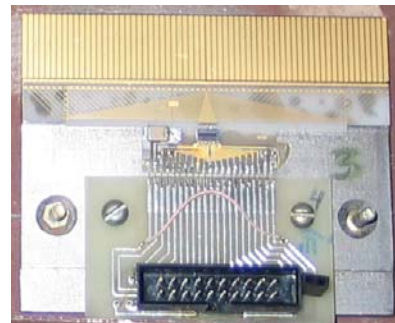
Рис. 2. Фрагменты детекторных чипов, наблюдаемые в окуляре микроскопа, при 50-и кратном увеличении

Микрополосковые и пиксельные детекторы были использованы для точного определения координат заряженных частиц в физике высоких энергий. Для минимально ионизирующих частиц (МИЧ) достигнуто координатное разрешение 14 мкм. Все 3 типа детекторов также широко

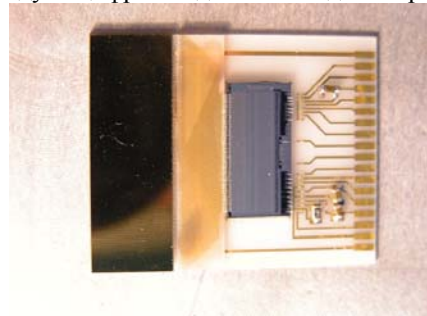
используются для конструирования модулей цифрового изображения в рентгеновских и гамма лучах. Термин цифровой означает, что детекторы принципиально обеспечивают счёт единичных квантов с энергией более 10 кэВ. В нижеследующем разделе мы приводим без особых комментариев иллюстрации некоторых оригинальных технических разработок с использованием квантово-чувствительных детекторов.

Системы цифрового изображения в X-лучах

На основе квантово-чувствительных детекторов созданы модули цифрового изображения в рентгеновских и гамма лучах с пространственным разрешением до величины 5,6 пар линий на мм, динамическим диапазоном 10^3 , пороговым контрастом до 0,5% и лучевой нагрузкой на исследуемый объект в десятки раз меньшей в сравнении с существующими аналогами. Единичные кванты рентгеновского либо гамма излучения преобразуются в каждом отдельном канале сканирующей линейки в импульсы тока, которые усиливаются и преобразовываются в формат, «понятный» для аналого-цифрового преобразователя (АЦП). В результате пространственное распределение интенсивности преобразуется поканально в цифровой код. Модули цифрового изображения представлены на рисунке 3.



а) модуль цифровой для систем досмотровых



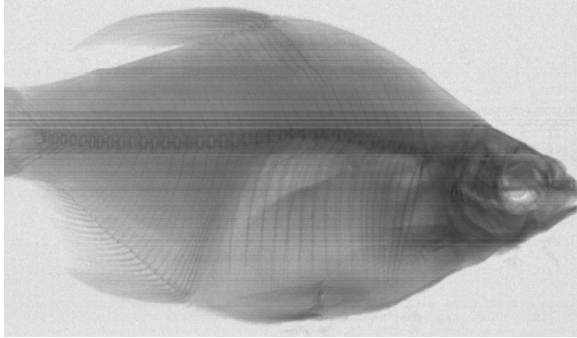
б) модуль для систем дефектоскопии

Рис. 3 Модули цифрового изображения

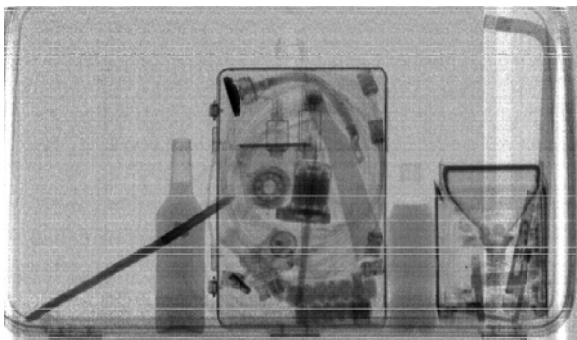
Изображения объектов, полученные в системах с арсенид галлиевыми детекторами

Отдельные модули изображения komponуются в единую многоканальную систему со сканированием строки по вертикали.

На рисунке 4 приведено изображение некоторых малококонтрастных объектов, которое было получено с помощью разработанных блоков детекторных с арсенид галлиевыми детекторами.



а) Изображение рыбы



б) Изображение портфеля, заполненного различными предметами. $E_\gamma = 3 \text{ МэВ}$

Рисунок 5. Изображение некоторых малококонтрастных объектов, которое было получено с помощью разработанных блоков детекторных с GaAs детекторами

Полный кадр сушеной рыбы от головы до хвоста формировался за время 1 с. Сканирование единичной строки осуществлялось в течение 5 мс. Анализ качества полученного изображения и наблюдаемая тонкая структура анатомии леща свидетельствуют, что в эксперименте достигается пороговая контрастность лучше 0,5%.

Заключение

За последнее десятилетие произошли революционные изменения, касающиеся формирования высокоинтенсивных пучков

рентгеновского гамма-излучения. Развита и широко используется технология использования синхротронного излучения для статического изучения и измерения объектов в диапазоне нанометровом диапазоне с фемтосекундным разрешением. Интенсивно происходит дальнейшее развитие указанной технологии и сооружение источников монохроматического и когерентного рентгеновского излучения фемтосекундной длительности на базе лазеров на свободных электронах. Методические наработки, полученные в рамках создания детекторов гамма-излучения для фундаментальных исследований физики микромира и прикладных разработках для нанотехнологий, позволяют создавать современные полупроводниковые детекторы, эффективно регистрирующие изображения нанометровых объектов. Одним из наиболее перспективных материалов будущих детекторов должен стать GaAs, в изучение и расширение возможностей которого определяющий вклад вносят российские ученые. Все это вместе взятое дает основание ожидать появления в ближайшие годы серии новых научно-прикладных решений современных технологических проблем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Физический энциклопедический словарь// под ред. А.М.Прохорова. Москва, «Большая Российская энциклопедия», 1995, 930.
2. ATLAS Inner Detector Technical Design Report, CERN/LHCC/97-16, ATLAS TDR 4, 30 April 1997.
3. Radiation Imaging Detectors / Ed's by Smith K.M., Visschers J. // Proc. 3-th Intern. Workshop, Amsterdam, The Netherlands, September 8-12, 2002.
4. Наука, технологии, изделия / Юбилейный сб. ФГУП «НИИПП» //Электронная промышленность. 2002. №2-3, 210.
5. Брудный В.Н. // Автореферат диссертации доктора физ.-мат. наук. 1993. 40с.
6. Smith K.M., et al. // Nucl. Instr. & Meth. In Phys. Res. 2001,-A460. P.204-206.
7. Вербицкая Е.М. и др. // ФТП. 1999. т.27. №12. С.2052 – 2067.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ в КВЧ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Юрченко В.И.

ОАО НИИПП, г. Томск.

В этом докладе представлен анализ систем контроля в КВЧ диапазоне длин волн изделий в различных областях народного хозяйства, описаны некоторые разработанные и используемые на практике автодинные и гомодинные радиолокационные устройства, работоспособность которых подтверждена экспериментальными исследованиями и они освоены в опытном производстве в ОАО НИИПП и других предприятиях.

В настоящее время проявилось две тенденции развития твердотельной СВЧ электроники: интенсивное освоение миллиметрового (крайне высокочастотного) диапазона, связанное с построением надёжных систем различного назначения (таб.1) связи, систем ближней

радиолокации и радионавигации, изделий специального назначения, а также миниатюризация устройств электроники. Это вызвано преимуществами крайне высокочастотного (КВЧ) диапазона (30÷300 ГГц) по сравнению с сверхвысокочастотным (0,3÷30 ГГц) диапазоном (более высокая разрешающая способность, меньшие габариты и масса аппаратуры). По сравнению же с оптическим диапазоном, также выявлены преимущества (прохождение электромагнитных волн в окнах прозрачности при любых погодных условиях, наличие полос поглощения в атмосфере рис. 1, что обеспечивает скрытость связи между объектами)

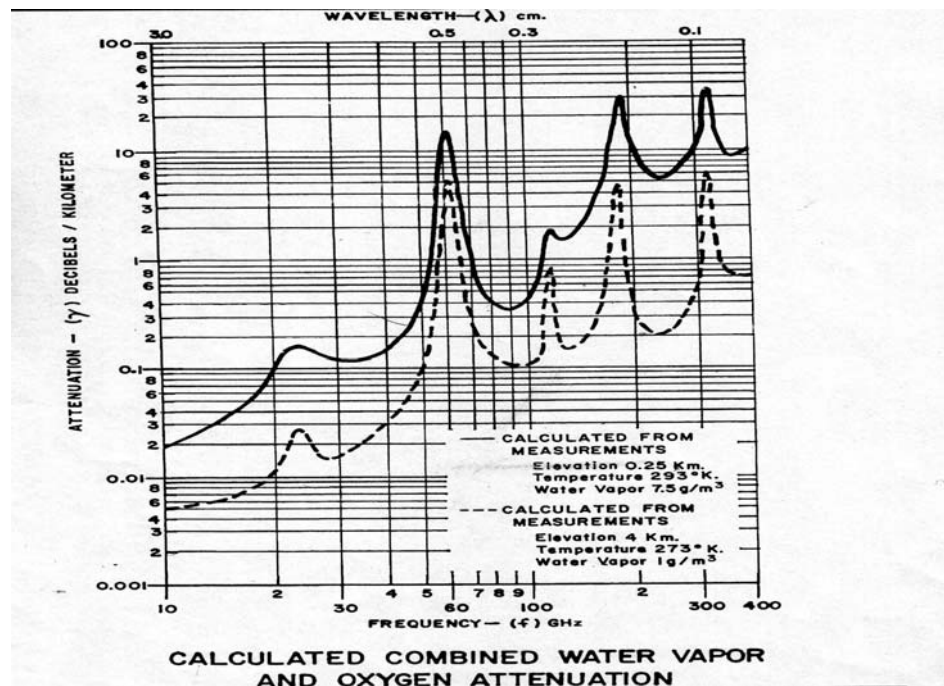


Рис.1.Спектр поглощения миллиметровых волн в атмосфере

Генераторы и автодины в объемном (волноводном) исполнении в ряде случаев не удовлетворяют требованиям по высокой механической прочности, отсутствию низких резонансных частот самой конструкции при вибрационных нагрузках, степени миниатюризации, технологичности изготовления и стоимости. Разработка и применение генераторных модулей (ГМ) [1-7] в виде гибридно-интегральных схем (ГИС) позволяет

реализовать такие преимущества гибридно-интегральных схем, как малый вес, простота изготовления, высокая технологичность, а также низкую стоимость. Разработка высоконадёжных, стабильных малогабаритных гибридно-интегральных схем КВЧ в значительной мере позволит решать данные задачи, что особенно важно для создания измерительной техники [1-2].

Таблица 1

Миллиметровый (КВЧ) диапазон волн(30 – 300 ГГц): наиболее важные области использования
фундаментальная наука (радиоспектроскопия, радиоастрономия, дистанционное зондирование атмосферы, диагностика плазмы, процессы горения, изучение биологических объектов, медицина и др.)
ближняя локация (головки самонаведения ракет и снарядов, автомобильные радары и антирадары, бытовые и промышленные охранные устройства)
беспроводная направленная связь для передачи больших объёмов компьютерной информации (объединение территориально-разделённых локальных сетей, связь «последней мили», связь «точка-точка»)
радиовидение (в условиях тумана, дыма, пыли, облачности, снегопада, метели, скрытой маскировки)
системы контроля (экологический мониторинг, измерители расстояния, скорости и т.д.)

Использование в качестве активных элементов в гибридно-интегральных схемах КВЧ диодов Ганна (ДГ) по совокупности электрических параметров, таких как рабочая частота, спектральная плотность мощности шума, энергетический потенциал в автодинном режиме, низкое рабочее напряжение, является более предпочтительным, чем туннельные и лавинно-пролётные диоды или полевые транзисторы [8,10-12].

Реализована [9,19-25] разработка систем ближней радиолокации для транспортной электроники, а именно, для контроля и измерения скорости транспортного средства (ТС), направления движения и тормозного пути и заноса ТС при торможении. Автодинные модули используются также в качестве датчиков диагностической аппаратуры: измерители частоты вращения (радиолокационные тахометры), измерители вибраций, созданы измерительные системы контроля параметров, характеристик и физических свойств различных материалов и изделий. Разработанные генераторные модули нашли применение также в терапевтической

медицинской аппаратуре в качестве источников физиологически активных частот.

Конструктивно-технологические принципы создания МИС

Основные особенности конструкций и технологии монолитных схем мм диапазона, предназначенных для монтажа в Е-плоскости волновода, наиболее полно описаны Божковым В.Г. [3]. Принципиальной особенностью технологии и конструкции МИС подобного типа является то, что при разделении пластины на отдельные чипы - схемы, удаляется большая часть подложки вместе с n+-п-слоями. Несущей конструкцией МИС является не подложка, как в обычных МИС, а металлизация. Толщина металлизации порядка 10 мкм позволяет осуществлять монтаж схем в волновод. Размеры схем таковы, что они ложатся на края волноводного канала с перекрытием 100-200 мкм. Малая толщина металлизации исключает необходимость создания специальной выемки в корпусе под схему. Схема закрепляется сжатием двух половинок волноводного корпуса рис.2.

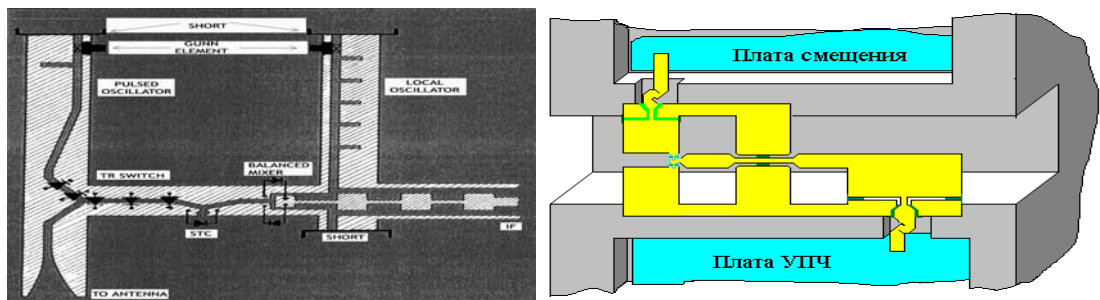


Рис.2. Топология и конструкция модулей МИС

МИС изготавливается с выводами для подачи питания и других сигналов, которые при монтаже легко отгибаются благодаря специальной форме. В конструкции корпуса предусмотрены выемки для размещения кристаллов-фильтров, выходящих за пределы волноводного канала для исключения возможности закорачивания выводов на корпус.

Для модулей и устройств, предназначенных для работы в жёстких условиях, предусмотрено заполнение волноводного канала диэлектриком - эпоксиноволачным пенопластом с низкой (<1,5) диэлектрической проницаемостью и малыми

потерями. При этом механическая прочность модулей увеличивается настолько, что они выдерживают ударные нагрузки более 20000g. КВЧ модули с заполнением выдерживают длительные испытания на влагуустойчивость. С использованием этих решений разработан сверхмалогобаритный (<7см³), ударопрочный 3-канальный датчик 3 мм диапазона рис.3.

В таблице 2 представлены основные конструкции автодинов и направления их использования.

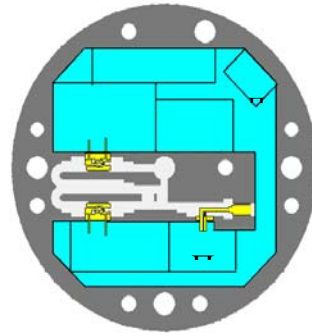
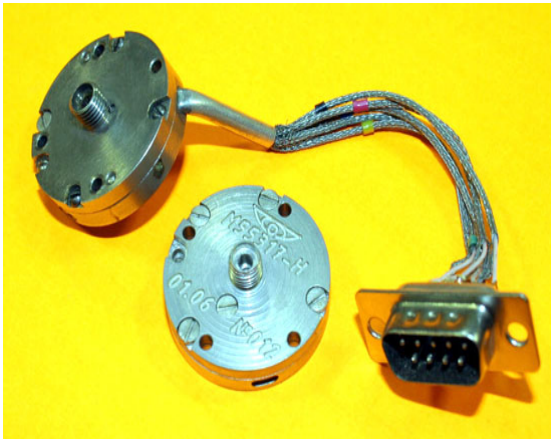


Рис. 3. Внешний вид и топология 3-х канального КВЧ датчика

Таблица 2

Применение автодинов в транспортной электронике

<p><u>Автомобильная электроника:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - РЛС предупреждения столкновения; - измерители скорости автотранспортных средств; - системы автоблокировки; - измерители характеристик торможения; - охранные устройства 	<p><u>Системы контроля:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - измерители расстояния; - бытовые и промышленные охранные устройства; - медицинские КВЧ аппараты; - бесконтактные тахометры и др. 	
--	---	--

Прибор для контроля тормозной системы автотранспортных средств на основе трёхканального автодина

Проблема безопасности дорожного движения (автомобильного и железнодорожного) очень остро стоит сегодня не только в России, но и в мире. Сегодня в авариях погибает в шесть раз больше людей, чем во всех вооружённых конфликтах. Проверка тормозных систем является самой сложной, трудоёмкой и ответственной из операций контроля технического состояния автомобиля.

Прибор [21-25] (рис4) разработанный совместно с НИИ электронных приборов (Новосибирск) обеспечивает: измерение начальной скорости при торможении, допусковый контроль усилия на органе управления тормозной системы, время срабатывания тормозов, тормозной путь в продольном направлении, установившееся замедление в продольном направлении, поперечное смещение АТС от прямолинейной траектории (занос). Прибор представляет собой малогабаритный трёхлучевой радиолокатор сверхмалой мощности и состоит из трёх основных узлов: выносного автодинного приёмопередающего моноблока, датчика давления на тормозную педаль (на основе тензомоста) и вычислительного устройства, которое производит обработку радиолокационной информации,

визуализацию и документирование результатов измерений

Устройства ближней радиолокации на основе автодинных модулей для решения задач железнодорожного транспорта

Автодинные радиолокаторы нашли широкое распространение на железнодорожном транспорте. Эти устройства [9-12] позволяют измерять скорость роспуска отцепов на сортировочной горке и скорость движения поезда, обнаруживать препятствия на железнодорожном полотне и переездах, определять наличие подвижных единиц на стрелочных переводах и тормозных позициях, выявлять степень заполнения подгорочных путей на сортировочных горках, считывать информацию с подвижного состава, определять параметры движения подвижного состава и т.п.

Создание, разработка и использование подобных устройств позволяет повысить безопасность движения поездов, увеличить провозную и пропускную способность железных дорог, т.е. улучшить те показатели работы железно-дорожного транспорта, которые являются наиболее важными.

Характерной особенностью радиолокаторов применяемых на железно-дорожном транспорте, является то, что они работают на малых расстояниях. Указанные причины, а также

специфика работы железнодорожного транспорта способствовали разработке радиолокаторов, построенных на автодинном принципе, которые наиболее полно отвечают перечисленным требованиям.

Применение в качестве автодинного датчика гибридно-интегральной схемы КВЧ на 2-х

мезовом планарном диоде Ганна [8] позволяет, при сохранении энергетического потенциала автодина, снизить энергопотребление ещё на порядок по сравнению с корпусными серийными диодами Ганна.

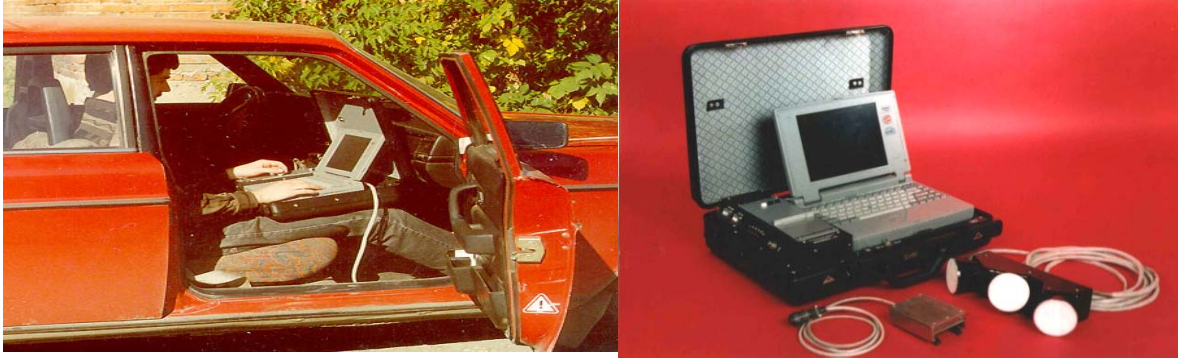


Рис.4 Прибор экспресс контроля

Применение автодинов КВЧ диапазона в измерительной технике
Радиоволновый автодинный тахометр 5-мм диапазона длин волн

Для автоматизированного управления вращением валов судовых дизельных двигателей, роторов турбин авиационных моторов и других вращающихся узлов и механизмов зачастую требуются датчики скорости вращения, у которых при отсутствии механического контакта с контролируемым объектом обеспечиваются достаточно высокие точность и быстродействие измерения. Данным требованиям наиболее полно удовлетворяет разработанный радиолокационный тахометр, выполненный на основе автодинной ГИС КВЧ типа М-55314 [17-18]. В отличие от известных доплеровских измерителей скорости вращения, построенных по гомодинной схеме [18], данное устройство имеет существенно меньшие габариты и стоимость благодаря своей очевидной простоте конструкции.

Принцип действия тахометра основан на автодинном эффекте, заключающемся, как уже было сказано выше, в изменении параметров колебаний автогенератора, находящегося под воздействием собственного отражённого излучения. Данное излучение, полученное от неоднородностей поверхности вращающегося объекта, вызывает изменения тока в цепи питания генератора с доплеровской частотой.

Конструктивно тахометр состоит из двух блоков: датчика и блока преобразования. Датчик содержит автодинный приёмопередающий модуль 5-мм диапазона типа М55314, и осесимметричную рупорную антенну в раскрытие которой установлена диэлектрическая линза, формирующая плоский фазовый фронт, при этом датчик и антенна представляют собой единую

конструкцию. В блоке преобразования собрана схема регистрации (выделения) автодинного сигнала, преобразователь “частота-напряжение”, цифровой индикатор числа оборотов в минуту и блок питания.

Облучение поверхности вращающегося объекта производится под углом 45° . Необходимыми для нормальной работы тахометра неоднородности, обеспечивающие диффузионное отражение зондирующего сигнала, являются естественные шероховатости на поверхности объекта, созданные с помощью накатки, углубления, выступы или шестерёнки передач.

На рис. 5 внешний вид тахометра на автодинных генераторах Ганна.

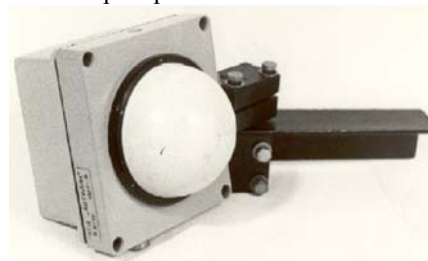


Рис.5 Тахометр

Тахометр рассчитан на диапазон измеряемых скоростей вращения вала от 150 до 1500 об/мин. Погрешность измерения скорости вращения менее 1,5 об/мин в интервале скоростей 600-1100 об/мин и не хуже 3 об/мин в интервале скоростей во всём интервале. Диаметр вращающегося объекта, определяющий линейную скорость, учитывается коэффициентом тахометрии в преобразовательном блоке перед установкой на объект. Постоянная времени измерения, адаптированная к скорости вращения объекта не превышает 5 мсек.

Установка КВЧ дефектоскопии на основе автодинных ГИС

Развитие производства высококачественных материалов и требования к отсутствию в них дефектов требует развития установок для их визуализации. В ряде применений затруднено использование оптических методов, кроме того, они не позволяют определять наличие скрытых дефектов. Применение рентгеновских установок, являющихся сложными, дорогими и использующих опасные для персонала жёсткие излучения, как правило, нецелесообразно, так как требуется оперативный и малоинерционный метод оценки дефектности, пригодный для использования в производственных условиях.

Радиоволновые методы неразрушающего контроля широко используются для бесконтактного определения физических параметров различных материалов и в дефектоскопии. Основными элементами измерительных систем, обеспечивающими получение первичной информации об объекте контроля являются датчики, во многом определяющие параметры и характеристики всей системы. (рис. 6).

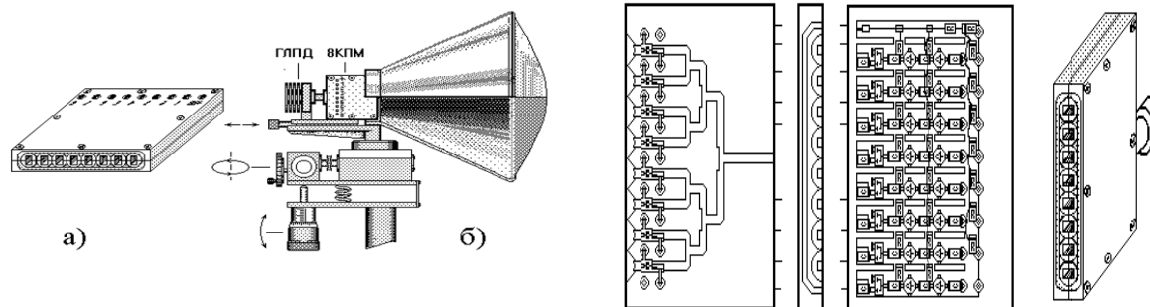


Рис.6. Многоканальные модули для систем измерительной техники

Применение автодинных приёмопередающих модулей в гибридно-интегральном исполнении на ММДГ для определения предаварийных деформаций лопаток турбомашин

Своевременное обнаружение предельных деформаций лопаток позволяет предупредить их поломку и избежать разрушения двигателя. В настоящее время известен ряд бесконтактных методов и измерительных средств [18], позволяющих получать информацию о состоянии лопаточного венца турбомашин. Эти методы и средства используются при конструкторской доводке турбомашин для оценки механических напряжений в лопатках компрессорных и рабочих колёс, для контроля уровней предельных деформаций лопаток на стационарных и транспортных двигательных установках.

Один из этих методов – дискретно-фазовый (ДФМ) получил широкое распространение и развитие в авиационных и машиностроительных фирмах различных стран [18]. ДФМ основан на измерении временных интервалов между

В разработанной дефектоскопической установке [14-16] применён автодинный датчик М-55314 [9]. Установка, позволяет осуществлять автоматизированный контроль плоских объектов и получать их изображения.

Для уменьшения площади воздействия (до 0,1-0,3 мм) зондирующего КВЧ сигнала, к датчику подключена антенна, состоящая из двух металлических пластин убывающей ширины, согласующая выходное волновое сопротивление датчика и свободное пространство. Повышение разрешающей способности установки может быть достигнуто оптимизацией конструкции антенны, уменьшением шага сканирования установки.

Полученные результаты, а также конструктивная простота, высокая надёжность и низкая стоимость разработанных автодинных ГИС КВЧ на мезапланарных ганновских структурах, наиболее важного узла различных радиотехнических систем для бесконтактных измерений и контроля, позволяет надеяться на их широкое применение.

моментами прохождения торцов лопаток мимо импульсных датчиков, установленных неподвижно в корпусе турбомашин. Основное преимущество ДФМ – возможность определения деформаций одновременно всех лопаток колеса турбомашин.

Простота конструкции датчика на ППМ, малые габариты, простота схемной реализации и съёма информационного сигнала, малое энергопотребление, надёжность, вибрационная прочность, хорошая помехозащищённость (использование КВЧ диапазона в качестве рабочих частот), делают такие преобразователи привлекательными для разработчиков аппаратуры ДФМ. Важным преимуществом датчиков на ППМ с ДГ является возможность расширения температурного диапазона до необходимых 1200⁰С путём герметизации (заполнения) волноводной (рабочей) части датчика радиопрозрачной керамикой или кварцевым стеклом.

При введении первичного преобразователя на ППМ с ДГ в состав сигнализатора предаварийных деформаций лопаток (СПДЛ), разработанного в

Самарском государственном аэрокосмическом университете и используемом на магистральных газокomppressorных станциях, появляется возможность контроля текущего состояния лопаток не только компрессорных ступеней, но и рабочих лопаток турбины, экспресс-анализа их работоспособности, фиксирования их эксплуатационного состояния, протоколирования результатов их осмотра, создания технического паспорта любого конкретного лопаточного колеса.

Рассмотренный вариант реализации ДФМ на автодинных ППМ обладает простотой конструктивной реализации, надёжностью и высокими метрологическими характеристиками. На основе автодинных ППМ можно реализовать чувствительные, помехоустойчивые, высокотемпературные первичные преобразователи.

Использование генераторных ГИС на ММДГ в автономном устройстве информационно-волновой терапии и аппаратуре КВЧ терапии.

Освоение современных технологий с использованием биоэнерго-информационных воздействий показало, что человеческий организм – это глубоко самоорганизующаяся и саморегулирующаяся структура, состоящая из иерархически самоподобных клеточных структур. Успехи КВЧ биорезонансной и информационно-волновой (шумовой) терапии подтверждают, что человеческий организм обладает электромагнитным информационным каркасом, способным реагировать на воздействие электромагнитных колебаний (ЭМК) сверхмалых ($\sim 10^{-18} \div 10^{-21}$) Вт/м² Гц, предпороговых мощностей, в КВЧ диапазоне длин волн.

Большое количество теоретических и экспериментальных исследований позволяет сделать вывод, что в диапазоне КВЧ существуют каналы воздействия ЭМК на организм человека. Особо следует отметить влияние КВЧ при воздействии на биологически активные зоны (зоны Гада-Захарьина, метафизические энергетические центры – чакры, крупные суставы) и на точки акупунктуры, что открывает широкие возможности применения КВЧ для регуляции жизнедеятельности человека.

Появление твёрдотельных генераторов на диодах Ганна и лавинно-пролётных диодах на GaAs КВЧ диапазона стимулировало проведение биомедицинских исследований и создание различных биоэнергоинформационных устройств – модуляторов.

Сверхнизкие (гомеопатические) уровни ($10^{-15} \div 10^{-18}$) Вт/см² миллиметрового излучения выполняют синхронизирующую и корректирующую роль, восстанавливая физиологическое равновесие поражённых органов. В настоящее время ни одно

лекарственное средство столь широким спектром воздействия не обладает.

Организм и его функционирующие системы являются источником чрезвычайно слабых ЭМК в широком спектре частот. Каждый орган имеет свою частоту, здоровые органы имеют схожие спектры частот. ЭМК – это уровень управления, они стимулируют и контролируют все процессы жизнедеятельности в организме. При патологиях возникают новые источники ЭМК, не характерные для здорового организма. При нарушении динамического равновесия между физиологическими (гармоническими) и патологическими (промодулированными по частоте, фазе и амплитуде по закону, зависящему от характера патологии), возникает информационно-энергетическая блокада, дающая толчок для запуска патологических реакций, образованием гомотоксинов. Любое заболевание рассматривается как выражение борьбы защитных сил организма компенсировать токсические поражения. Кроме того, заболевание есть естественный целесообразный процесс, способствующий дезинтоксикации, выведению гомотоксинов и компенсации токсических поражений, при которых происходит соединение одного или нескольких гомотоксинов в гомотоксон (нетоксическое вещество), которое в дальнейшем эвакуируется из организма человека.


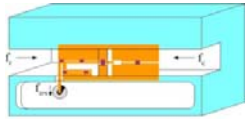
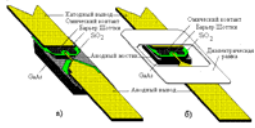
На базе экспериментального отдела кафедры госпитальной хирургии СГМУ проведена серия экспериментов по облучению животных ЭМИ КВЧ в диапазоне 59-63 ГГц на фоне токсического действия паров эфира, который вводился животным ингаляционным путём. Полученные результаты морфологических исследований позволяют считать, что ЭМИ указанного диапазона шумового характера обладают профилактическим действием по развитию токсико-дегенеративных изменений в органах и тканях (печени, лёгких, тимусе, костном мозге и т. д.).

Использование в медицине разработанных устройств на основе кристаллов из арсенида галлия, обладающих отрицательной дифференциальной проводимостью, повышают неспецифическую резистентность организма, мобилизуют его резервы, повышают иммунный статус за счёт синхронизации клеточных структур организма [26]. Универсальность подхода и максимальная индивидуализация лечения в каждом конкретном случае необычайно расширяют диапазон возможностей их применения. При необходимости использование капсул БРТ и ИВТ (с встроенным источником питания или без него) применяют в сочетании с другими методами, как медикаментозными, так и физиотерапевтическими.

Таблица 3
Основные пути модернизации КВЧ систем

Выводы

Воторопин, В.И. Юрченко, Б.А. Наливайко.

			
Задачи модернизации	Развитие существующих изделий в производстве	Организация новых разработок	Создания перспективных изделий
Направления реализации	Рентабельность	Создание критически важной номенклатуры	Задел нанотехнологий
Критерии реализации	Учет потребностей	Сроки разработки	Системы в кристалле
	Повышение качества	Поставка на стадии разработки	Субмодули
	Расширение номенклатуры	Новые методы проектирования	Освоение новых диапазонов длин волн

1. На основе большого числа в разработок показана эффективность применения КВЧ автодинных датчиков для решения задач различного назначения.

2. Разработанные автодинные ГИС КВЧ типа М-55314 применены при создании различных устройств контроля в том числе материалов и живых систем

6. В плане дальнейшего развития и совершенствования автодинных КВЧ систем контроля необходимо всестороннее исследование многоэлементных автодинов с различными видами модуляции, а также поиск новых конструктивных решений ГИС КВЧ на основе многомерных планарных диодов Ганна, нетрадиционных способов регистрации и методов обработки полезного сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. – М: Энергоатомиздат, 1989. – 208 с.

2. Пономарев А.А., Юрченко В.И., Яук Э.Ф. Возможности использования и перспективы развития СВЧ датчиков в ОАО НИИПП Материалы конференции «Информационно-измерительная техника и технологии» 25-26 февраля 2010 г. г Томск. Стр. 21-25.

3. Божков В.Г., Генеберг В.А., Куркан К.И., Перфильев В.И. Монолитные и квазимонолитные модули и устройства миллиметрового диапазона длин волн. Электронная промышленность. 2001г, №5, стр. 77-97.

4. Авт. св. № 902642 СССР МКИ Н03В 9/12 от 01.10.81. СВЧ генератор /С.Д. Воторопин, В.И. Юрченко, Б.А. Наливайко.(СССР).- 2982370/09.- 3с.: ил. 1.

5. Авт. св. № 192616 СССР МКИ Н03В 9/12 от 02.09.83. Генератор СВЧ колебаний / С.Д.

(СССР). –3052738. Зарег. 02.09.83. – 2 с.: ил.

6. Авт. св. № 147955 СССР МКИ Н03В,С 9/00, 9/12. Полосковый генератор / С.Д. Воторопин, В.И. Юрченко, Б.А. Наливайко (СССР). – 2266782. Зарег.07.08.80. – 3 с.: ил. 1.

7. Авт. св. № 143302 СССР МКИ Н03В 9/00, 9/12 от 6.05.79 / Полосковое СВЧ устройство / С.Д. Воторопин, В.И. Юрченко, Б.А. Наливайко. 2259068. Зарег. 06.05.80. – 3 с.: ил. 1.

8. Патент РФ № 2064718, МКИ Н01 L 47/02. Диод Ганна / С.Д. Воторопин, В.И. Юрченко, А.М. Кожемякин (РФ). 5046020/25; Заявлено 04.06.92; Зарег. 27.07.96., Б.И. № 21. – С. 3.

9. Воторопин С.Д. Разработка автодинных датчиков 5 мм диапазона длин волн для транспортной электроники: Отчёт НИИПП по ОКР “Тигель” – Томск, 1991. – 75 с.

10. Воторопин С.Д., Юрченко В.И. Микроволновые автодинные датчики на диодах Ганна // II международная конференция “Датчик-95”. Тезисы докладов. – Барнаул. – 1995. – С. 18.

11. Воторопин С.Д., Юрченко В.И. Автодинные микроволновые датчики на маломощных диодах Ганна // VIII Международная конференция “Датчик-96” . Сборник докладов. – Гурзуф: – 1996. – С. 61-62.

12. Воторопин С.Д., Юрченко В.И. Автодины на диодах Ганна и устройства на их основе // Электронная промышленность, 1998. – Вып. 1-2. – С. 110-115.

13. Воторопин С.Д., Крылов С.В., Юрченко В.И. Разработка малогабаритных датчиков КВЧ диапазона для контроля параметров различных объектов // III Всероссийская НТК “Методы и средства измерений физических величин” (июнь 1998 г., г. Н. Новгород). Сб. докладов. Т. VII. – Н. Новгород, 1998. – С. 41-42.

14. Крылов С.В., Юрченко А.В., Воторопин С.Д., Юрченко В.И. Установка визуализации и определения мест дефектов в плоских материалах на основе КВЧ автодинных датчиков 5 мм

диапазона // III Всероссийская НТК “Методы и средства измерений физических величин” (июнь 1998 г., г. Н. Новгород). Сб. докладов. Т. V. – Н. Новгород, 1998. – С. 4-5.

15. Юрченко А.В., Воторопин С.Д., Юрченко В.И. Установка для визуализации и определения мест расположения дефектов в солнечных элементах на основе автодинных датчиков 5 мм диапазона длин волн // VIII Крымская Международная Микроволновая Конференция “КрыМиКо’98” (сентябрь 1998, Севастополь). Сб. докл. – Севастополь, 1998. С. 324-326.

16. Воторопин С.Д., Чихман А.В. и др. Автоматизированная установка контроля материалов на основе автодинных датчиков КВЧ диапазона // Электронная промышленность, 1998. – Вып. 1-2. – С. 136-137.

17. Данилин А.И., Воторопин С.Д., Чернявский А.Ж. Применение автодинных генераторов М-55314 для контроля механических напряжений лопаток ГТД // Электронная промышленность, 2002. – Вып. 2. – С. 131-134.

18. Votoropin S.D., Danilin A.I. Using of GIS EHF autodyne transceiver modules on mesa-planar Gunn diodes for definition of turbomachine blades deformations // III IEEE-RUSSIA Conference: MIAME-2001 (2001, September

19. Патент РФ № 2064718, МКИ H01 L 47/02. Диод Ганна / С.Д. Воторопин, В.И. Юрченко, А.М. Кожемякин (РФ). 5046020/25; Заявлено 04.06.92; Зарег. 27.07.96., Б.И. № 21. – С. 3.

20. Воторопин С.Д., Юрченко В.И. Автодинные микроволновые датчики на маломощных диодах Ганна // VIII Международная конференция “Датчик-96”. Сборник докладов. – Гурзуф: – 1996. – С. 61-62.

21. Воторопин С.Д., Юрченко В.И. Автодины на диодах Ганна и устройства на их основе // Электронная промышленность. – Вып. 1-2. – 1998. – С. 110 – 115.

22. Воторопин С.Д. Автодинный КВЧ радиолокатор для контроля параметров движения автомобиля // Труды IV Международной научно-технической конференции “Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ” (13-19 сентября 1999 г., г. Самара). – Самара, 1999. – С. 37-39.

23. Воторопин С.Д., Юрчаков В.П. Автономное устройство контроля параметров движения транспортных средств на автодинных датчиках КВЧ диапазона // III Всероссийская конференция “Методы и средства измерения

физических величин” (июнь 1998 г., г. Н. Новгород). Сб. трудов. Ч. 7. – Н. Новгород, 1998. – С. 43.

24. Воторопин С.Д., Юрчаков В.П. Применение автодинных датчиков КВЧ диапазона в транспортной электронике // Труды VIII Крымской конференции CriMiCo-98 (сентябрь 1998 г., г. Севастополь). – Севастополь, 1998. – С. 617 - 619.

25. Воторопин С.Д. Автодинный КВЧ радиолокатор для контроля параметров движения автомобиля // IV Международная НТК “Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ” (14-18 сентября 1999 г., г. Самара). Сб. докл. – Самара, 1999. – С. 22-23.

26. Воторопин С.Д., Юрчаков В.П. Принципы построения доплеровских измерителей скорости для контроля параметров тормозной системы автотранспортных средств // V Международная НТК “Физика и технические приложения волновых процессов” ((10-16 сентября 2001 г., г. Самара). Сб. докл. – Самара, 2001. – С. 17-20.

27. Votoropin S.D., Yurchakov V.P. Application of Autodyne EHF-Band Sensor for Transport Electronics // II IEEE-RUSSIA Conference: MIAME-1999 (September, 21-23, 1999, Novosibirsk). Trans. – Novosibirsk, 1999. – P. III.55-III-56.

28. Воторопин С.Д., Юрчаков В.П. Применение трёхлучевого автодина при экспресс контроле тормозного пути автотранспортного средства // X Международная конференция “КрыМиКо-2000” (октябрь 2000 г., г. Севастополь). Сб. докл. – Севастополь, 2000. – С. 584-586.

29. Воторопин С.Д., Юрчаков В.П. Применение трёхлучевого автодина при экспресс контроле тормозного пути автотранспортного средства. // V Международная конференция АПЭП-2000 (26-29 сентября 2000 г., г. Новосибирск). Сб. докл. – Новосибирск, 2000. – С. 11-15.

30. Воторопин С.Д., Юрчаков В.П. Применение автодинов на ММДГ в транспортной электронике при контроле тормозной системы // Электронная промышленность, 2002. – Вып. 2. – С. 89-101.

31. Попов Б.М., Воторопин С.Д., Применение КВЧ в лечении тяжёлого осложнения сахарного диабета – диабетической стопы // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – Вып. 5. – М., 1995. – С. 51.

КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЛЁТНЫХ ПАРТИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НАВИГАЦИИ И СВЯЗИ

Максимов Ю.В.¹, Кочура С.Г.¹, Максимов И.А.¹, Иванов В.В.¹, Арчаков В.Г.², Вавилов В.В.², Клименов В.А.³, Зыков В.М.³.

¹ОАО «ИСС», E-mail qmaximov@iss-reshetnev.ru

²ОАО «НПЦ «Полюс», E-mail polus@online.tomsk.net

³ИНК НИ ТПУ E-mail E-mail vmzykov@mail.tomsknet.ru

В данном докладе рассмотрена система контроля и диагностики лётных партий электронных компонентов КМОП, биполярной и смешанной технологий осуществляемые в рамках разработанной системы гарантии стойкости бортовой аппаратуры космических аппаратов навигации и связи и учитывающие долговременное воздействие факторов космического пространства, включая факторы ионизирующих излучений космического пространства. Предлагаемая система контроля, диагностики и контрольных радиационных испытаний, включающая набор моделирующих радиационных установок, испытательной и контрольно-измерительной аппаратуры, обеспечивает отбраковку потенциально ненадежных компонентов и оценку радиационной стойкости закупленных партий электронных компонентов в приемлемые сроки.

Расчетно-экспериментальная оценка надежности бортовой аппаратуры (БА) космических аппаратов /1/ осуществляется на основе справочных данных по надежности /2/, полученным по результатам сертификационных и дополнительных испытаний (ДИ) с учетом резервирования и особенностей электрических режимов эксплуатации электронных компонентов (ЭК) в данной аппаратуре. Для обеспечения срока активного существования космических аппаратов навигации и связи до 15 лет и более необходимо ужесточать требования по надежности функционирования электронных компонентов БА в условиях долговременного действия факторов космического пространства. Дополнительные отбраковочные испытания этих компонентов и диагностические процедуры, проводимые на этапе проектирования и наземной экспериментальной отработки КА, могут учитываться в виде поправочных коэффициентов понижающих расчетные оценки вероятности их отказа /3/. Как правило, эти дополнительные испытания лётных партий ЭК проводятся в аккредитованных испытательных технических центрах и включают в себя

- отбраковочные испытания и диагностический неразрушающий контроль каждой партии ЭК, предназначенной для применения в лётном комплекте БА;

- разрушающий физический анализ в соответствии с требованиями РД В 319.04.47-2006 на выборке из испытываемой партии ЭК.

Необходимость дополнительных радиационных испытаний лётных партий сертифицированных ЭК обусловлена тем, что

- применяемая на этапе квалификационных испытаний ЭК методика оценки радиационной стойкости при мощности дозы 50 рад/с и более, основанная на комплексе стандартов «Климат-7», не позволяет получить достоверное значение радиационной стойкости интегральных схем, изготовленных по биполярной и смешанной технологии, к реальному воздействию низкоинтенсивных ионизирующих излучений космического пространства из-за отсутствия учета эффекта низкой мощности дозы;

- у одного и того же завода-изготовителя, выпускающего ЭК по одной и той же технологии, возможны значительные вариации радиационной стойкости ЭК от партии к партии.

Изменение радиационной стойкости биполярных интегральных схем от партии к партии могут быть, в частности, обусловлено /4/:

- неконтролируемым введением механических напряжений в структуру кристалла в процессе пассивации биполярной микросхемы (создании внешнего изолирующего слоя, например, из нитрида кремния);

- неконтролируемым введением водорода в процессе корпусирования биполярной ИС, что изменяет радиационный отклик путем его сдвига по шкале мощности дозы излучения;

- особенностями процесса металлизации проводящих дорожек ИС;

- дополнительными тепловыми нагрузками, например, за счет электротермотренировки или выдержки ИС при повышенной температуре (тепловой стресс изменяет радиационный отклик ИС как КМОП, так и биполярной технологии).

В ряде случаев дополнительные испытания, проводимые с учетом эффекта низкой мощности дозы, дают значение радиационной стойкости ЭК биполярной технологии которая в несколько раз меньше, чем стойкость определенная при квалификации по требованиям военных стандартов /4 /. Для КМОП ИС, наоборот, радиационная стойкость к параметрическим отказам в натуральных космических условиях, когда мощность дозы излучения не превышает 1 мрад/с,

может быть существенно выше, чем указанная в ТУ радиационная стойкость. Поэтому оценка надежности БА КА с длительным сроком активного существования проведённая без учета эффекта низкой мощности дозы, основываясь только на данных полученных при типовой процедуре квалификации, не является адекватной оценкой для ЭК как биполярной технологии, так и КМОП технологии. Зарубежный опыт указывает путь решения этой проблемы: модернизация испытательных стандартов с введением в них процедуры оценки эффекта низкой мощности дозы /MIL-STD 883, SSCC № 22900/ и организацию контрольных радиационных испытаний партий ЭК, закупленных для применения в лётном комплексе БА конкретного космического проекта. Ниже рассмотрен опыт организации испытательной инфраструктуры, проведения контрольных радиационных испытаний и диагностики лётных партий электронных компонентов бортовой аппаратуры космических аппаратов навигации и связи, проводимых в рамках системы гарантии стойкости БА КА с длительными сроками активного существования.

Общие требования контрольные радиационные испытания и диагностику ЭК на контрольные испытания и диагностику лётных партий ЭК определяются составом и характеристиками факторов космического пространства (ФКП) применительно к данному космическому проекту, наличием дополнительной аттестации выпускаемых ЭК на космическое применение, требованиями испытательных стандартов, требованиями предельного срока на комплектование БА (обычно не более 3-х месяцев) и требованием на надежность БА в космических условиях (допустимую вероятность отказа). ЭК ранее аттестованные на космическое применение по всему спектру ФКП проходят только процедуры входного контроля. Выбор алгоритма контрольных, отбраковочных испытаний и диагностических процедур для остальных компонентов выбирается исходя из технологии их изготовления и характеристик ФКП для данного космического проекта. Учитывая влияние электротермических испытательных воздействий на радиационную стойкость ЭК разных технологий, контрольные радиационные испытания на полную дозу ионизирующих излучений проводятся по окончании всех остальных дополнительных испытаний. Методология дополнительных испытаний и применяемые контрольно-диагностические процедуры преследуют несколько целей:

а) Определяют соответствующие условия, доступные для воспроизведения в лабораторных условиях, и количество оборудования, которые дают результаты испытаний эквивалентные

натурным условиям эксплуатации, а также обеспечивают воспроизводимость результатов.

б) Развивают положения ГОСТ РВ 20.57.415. КСРК с адаптацией к стандартам ESA № 22900, MIL-STD-883 и другим подобным методам с тем, чтобы обеспечить единообразие этих методов с минимизацией затрат времени и средств испытаний, применимость к широкой номенклатуре ЭК.

с) Обеспечивают единообразный уровень физических, электрических и радиационных испытаний, чтобы гарантировать качество и надежность всех ЭК, испытанных в соответствие с этой методологией.

Основная цель состоит в том, чтобы обеспечить условия разработки БА КА, соответствующей необходимому уровню стойкости к излучению. Этот уровень должен быть определен для конкретных условий применения и может быть получен или квалификацией радиационно-стойких ЭК, изготавливаемых по соответствующей аттестованной технологии, или отбором и квалификацией таких ЭК, которые согласуются с необходимой в данном проекте радиационной стойкостью, или же путем выбора менее радиационно-стойких элементов и удостоверения, что замена является возможной для предполагаемого срока службы БА КА.

Для осуществления контрольных испытаний и диагностики лётных партий ЭК была создана интегрированная испытательная инфраструктура, включающая набор моделирующих радиационных установок, испытательной и контрольно-измерительной аппаратуры, которая обеспечивает отбраковку потенциально-ненадежных компонентов и оценку радиационной стойкости закупленных партий электронных компонентов в приемлемые сроки.

Состав аппаратуры для измерения параметров ЭК и проведения дополнительных отбраковочных нерадиационных испытаний (включая электротермотренировку и отжиг после окончания радиационного воздействия) определяется необходимой точностью и диапазоном измерений, а также производительностью и экономической эффективностью. Для функционального и параметрического контроля интегральных микросхем и полупроводниковых приборов используется следующее оборудование: тестер параметров цифровых интегральных микросхем ETS-780/256, комплекс измерительный параметров аналоговых микросхем, ЦАП и АЦП типа ДМТ-419, система контрольно-измерительная для функционального и параметрического контроля БИС и микросхем памяти типа FORMULA 2K/64, комплекс измерительный параметров микросхем регуляторов напряжения типа ДМТ-401, тестер полупроводниковых приборов FORMULA ТТ и

ряд других. Аппаратура и соответствующие методики обеспечивают: разрушающий физический анализ (на выборке 2-3 шт.), измерение электрических параметров в нормальных условиях (100%), статистическую обработку результатов измерений (100%), установление (при необходимости) «ужесточенных» норм на электрические параметры (100%), классификацию по «ужесточенным» нормам на электрические параметры (100%), электротермотренировку минимум 72 часа при 125°C (100%), заключительное измерение электрических параметров в нормальных условиях (100%), статистическую обработку результатов измерений и установление норм по дрейфу параметров (100%), классификацию по дрейфу параметров (100%).

Используемая в бортовой аппаратуре номенклатура ЭК предварительно рассматривается на подверженность одиночным эффектам (SEE), вызываемым воздействием высокоэнергетических протонов и ионов тяжелых заряженных частиц. Этому виду испытаний подвергаются потенциально-ненадежные ЭК, изготовленные по КМОП-технологии, а также мощные (>1 Вт) МОП-транзисторы. Методология и процедуры испытаний определены в отечественной (РДВ319.03.24-97, РД134-0175-2009) нормативно-технической документации и зарубежных стандартах (ESA SCC 25100 Iss 1oct 2002, MIL-STD-750E, ASTM F1192-00). К ЭК, используемым в составе приборов космических аппаратов, разработки ОАО «Информационные спутниковые системы», предъявляются требования по отсутствию возникновения эффекта «зашелка», эффекта выгорания и пробоа подзатворного диэлектрика с пороговой линейной передачей энергии не менее 60 МэВ/(мг/см²). Это в свою очередь определяет требования к техническим характеристикам испытательных установок, которые должны обеспечивать: пробег ионов от 30 до 100 мкм, энергию ионов от 60 до 860 МэВ, плотность потока $10^2 - 10^5$ ион/(см² · с), неравномерность облучения – 10%, линейную передачу энергии 3 - 70 МэВ/(мг/см²), количество типов ионов -5 (например: ¹⁵N³⁺, ²⁰Ne⁴⁺, ⁴⁰Ar⁸⁺, ⁸⁴Kr¹⁷⁺, ¹³²Xe²⁶⁺). В 2010 году при создании ряда космических аппаратов ОАО «ИСС» провело испытания на одиночные эффекты 31 серии ЭК в компании TRAD (Франция) и 8 серий ЭК в ОИЯИ (г.Дубна) совместно с НИИП (г.Лыткарино). В результате были получены данные по параметрам чувствительности к воздействию ионов тяжелых заряженных частиц для более 160 типонаименований электронных компонент, что позволило решить проблему отсутствия данных в ТУ на ЭРИ отечественного производства, применяемых в составе электронного оборудования космических аппаратов ОАО «ИСС».

Испытательная радиационная инфраструктура для испытаний на полную дозу ионизирующих излучений должна, с одной стороны, учитывать радиационные эффекты низкой мощности дозы, а с другой стороны должна обеспечивать проведение контрольных радиационных испытаний лётных партий в короткие сроки. В состав разработанной испытательной инфраструктуры входят:

- линейный ускоритель электронов, обеспечивающий мощность дозы излучения в диапазоне 10 – 300 рад/с и аттестованный по комплексам стандартов «Климат-7» и «Мороз-6»;
- гамма-комплекс «Радиян», обеспечивающий проведение выборочных испытаний ЭК на полную дозу ионизирующего излучения в диапазоне мощности дозы 3- 0,05 рад/с с учетом требований европейского стандарта ESA 22900;
- гамма-комплекс «Радиян-2» с набором фильтров-поглотителей, обеспечивающий проведение выборочных испытаний ЭК в интервале мощности дозы 8 - 0,014 рад/с на полную дозу ионизирующего излучения с учетом требований европейского стандарта SSCC № 22900 (5 поддиапазонов в указанном интервале с дискретным изменением мощности дозы);

Поскольку максимальная доля ЭК бортовой аппаратуры, которые потенциально могут быть подвержены эффекту низкой мощности дозы, обычно не превосходит 50%, то указанный состав радиационных испытательных стендов близок к оптимальному. Основное назначение гамма-комплекса «Радиян-2» это проведение испытаний ЭК тех технологий, для которых насыщение радиационного отклика наблюдается при мощности дозы 0,1 - 1 рад/с (дискретные биполярные транзисторы, биполярные приборы с внутренними p-p-n микротранзисторами и др.). Основное назначение гамма-комплекса «Радиян» - проведение испытаний ЭК биполярной технологии потенциально подверженных эффекту низкой мощности дозы, а также биполярных ЭК явно не демонстрирующих эффект низкой мощности дозы, но потенциально испытывающих функциональные отказы при мощности дозы в несколько мрад/с. Распределение мощности дозы в поле излучения таких гамма-комплексов определяется геометрической расходимостью пучка гамма-излучения. Дозиметрическое сопровождение испытаний проводимых на гамма-комплексах имеет ряд особенностей, которые обусловлены изменением интенсивности радионуклида (Co-60) за счет радиоактивного распада и неравномерностью распределения дозы низкоэнергетического рассеянного гамма-излучения в ЭК за счет переходных эффектов в гетерогенных мишенях, которыми являются полупроводниковые структуры. Поэтому в процессе облучения ЭК, находящиеся на испытательных платах в активном электрическом

режиме, располагаются в (Pb-Al) контейнерах, которые обеспечивают фото-поглощение низкоэнергетической компоненты излучения и равновесный спектр электронов, близкий к спектру электронов в кремнии при облучении его высокоэнергетическими гамма-квантами. С целью обеспечения измерения дозы и мощности дозы гамма-излучения с погрешностью не хуже 5%, используются два прецизионных дозиметра ДКС-101, снабженные миниатюрной ионизационной камерой объемом 0,6 см³ и обеспечивающих измерение дозы и мощности дозы излучения с погрешностью не хуже 2,5%. При этом один дозиметр или оба предварительно поверяются как эталонные, что позволяет периодически проводить сличение их показаний. Для обеспечения заданных режимов облучения вся система для размещения испытательных плат в (Pb-Al) контейнерах может дистанционно перемещаться по рельсам с непрерывным контролем мощности дозы в заданной точке какой-либо испытательной платы (миниатюрная камера располагается между испытуемыми микросхемами или на их передней стенке). Общий вид гамма-излучателя без передвижного (Pb-Al)-контейнера для размещения испытательных плат представлен на рис. 1.



Рис.1 Дистанционно-управляемый источник гамма-излучения (Co-60) комплекса «Радиян»

Для одновременного облучения нескольких выборок ЭК при различной мощности дозы применяется способ секторирования, при котором весь телесный угол пучка гамма-излучения делится на секторы, причем каждый сектор обеспечивает облучение при определенной мощности дозы за счет размещения отдельного (Pb-Al) контейнера с испытуемыми ЭК на соответствующем расстоянии от источника гамма-излучения. Для сохранения конфигурации дозового поля на время выемки части плат для выполнения измерения параметров ЭК, их место занимают платы-муляжи с эквивалентной массовой толщиной.

Программы испытаний ЭК на полную дозу предусматривают пошаговый набор дозы до

интересующего уровня, отжиг после окончания облучения в течение 24 часов в активном электрическом режиме и нормальных условиях, также последующий длительный отжиг при температуре 100 °С в течение 168 часов в активном электрическом режиме. Пример графического представления результатов испытаний при низкой мощности дозы для ЭК биполярной технологии представлен на рис. 2 и рис.3

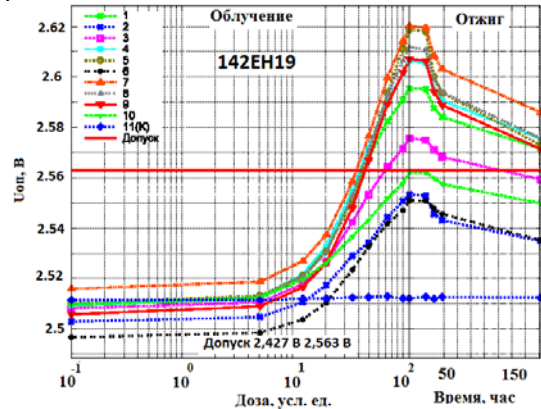


Рис. 2 Изменение опорного напряжения микросхемы 142ЕН19 (объем выборки 10 шт.) с выходом за пределы допуска в процессе облучения до интересующей дозы (мощность дозы 0,089 рад/с) и последующего отжига

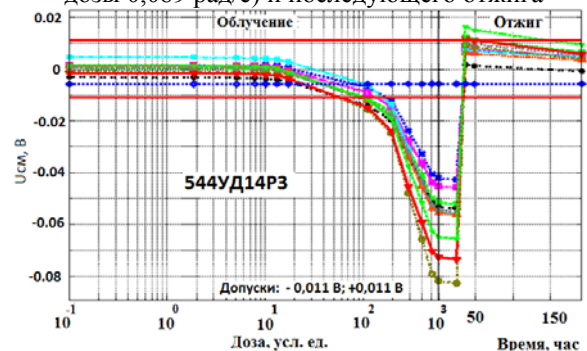


Рис.3 Изменение напряжения смещения операционного усилителя 544УД14РЗ с выходом за пределы допуска при гамма-облучении с мощностью дозы 0,096 рад/с и последующем отжиге (объем выборки 10 шт.)

По рассмотренной методологии были проведены входной контроль, диагностика и контрольные радиационные испытания 360-ти лётных партий ЭК более 200 типонаименований, изготовленных по разным технологиям. Было установлено, что ЭК биполярной технологии при низкоинтенсивном облучении более часто демонстрируют меньшую радиационную стойкость, чем та которую определили при сертификации. Кроме того, установлено влияние мощности дозы на характер отжига при повышенной температуре после облучения одной и той же дозой и близких дозовых изменениях критериального параметра ЭК.

По результатам данной работы можно сделать вывод, что представленная система диагностики и контроля радиационной стойкости электронных компонентов должна являться обязательной составной частью системы обеспечения комплектования бортовой аппаратуры космических аппаратов высоконадёжными электронными компонентами.

Актуальность внедрения изложенного подхода обоснована:

- обострением проблемы оценки и обеспечения требуемой надёжности функционирования бортовой аппаратуры КА с учётом длительного воздействия ионизирующего излучений космического пространства, вызванной необходимостью обеспечения длительности срока активного существования космических аппаратов связи и навигации 15 лет и более с учётом специфических дозовых эффектов и одиночных эффектов, возникающих при действии высокоэнергетических протонов и тяжелых заряженных частиц;

- необходимостью определения реальной стойкости применяемых в бортовой аппаратуре ЭК по дозовым эффектам, так как приведённые в ТУ на ЭК данные по радиационной стойкости были получены при квалификационных испытаниях на этапе освоения серийного производства и при дальнейших вариациях технологического процесса их экспериментальное подтверждение не проводилось;

- некорректностью распространения результатов испытаний электронных компонентов биполярной и КМОП технологии на стойкость к дозе ионизирующего излучения, полученных на этапе их квалификации при высокой мощности дозы в соответствии с действующими нормативными документами, на электронные компоненты бортовой аппаратуры, подвергаемые воздействию низкоинтенсивного ИИКП при эксплуатации КА.

Созданная интегрированная испытательная инфраструктура, включающая описанные моделирующие радиационные установки, испытательную и контрольно-измерительную аппаратуру, позволит в приемлемые сроки проводить выявление потенциально-ненадежных компонентов и оценивать радиационную стойкость партий электронных компонентов, предназначенных для применения в летных комплектах бортовой аппаратуры КА.

В качестве перспективных направлений развития системы диагностики и контроля представляются:

- внедрение методик ускоренных испытаний ЭК на радиационную стойкость, которые учитывают эффект низкой мощности дозы;

- индивидуальный отбор по радиационной стойкости КМОП ИС,

предназначенных для летных комплектов бортовой аппаратуры КА, на основе диагностики и индивидуального прогнозирования их стойкости /5/ по результатам типовых выборочных радиационных испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Надёжность ЭРИ: Справочник. 22ЦНИИ МО РФ, М., 2006.

2. Патраев В.Е., Максимов Ю.В. //Методы поэтапного обеспечения надёжности бортовой аппаратуры космических аппаратов со сроками активного существования 10-15 лет. «Известия вузов. Приборостроение», 2008, т.51, №8, с. 5-12.

3. Федосов В.В., Патраев В.Е. // Повышение надёжности радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов при применении изделий, прошедших дополнительные отбраковочные испытания в специализированных испытательных центрах. «Авиакосмическое приборостроение», 2006, №10, с. 50-56.

4. Schwank J. R., Shaneyfelt M. R. and Dodd P.E. //Radiation hardness assurance testing of microelectronic devices and integrated circuits: radiation environments, physical mechanisms and foundations for hardness assurance ,Sandia national laboratories, document sand-2008-6851P, 2008.

5. Зыков В.М. и др. // Способ разбраковки полупроводниковых приборов по радиационной стойкости, Патент 2253875 RU.

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ПРОЦЕССЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ КРУПНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО И УЛЬТАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО ТИТАНА

Шаркеев Ю.П., Вавилов В.П.*, Скрипняк В.А.***, Клименов В.А.*, О.А. Белявская, Д.А. Нестерук*, А.А. Козулин***, Толмачев А.И.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия, 634021, Томск, пр. Академический 2/4

*НИ Томский политехнический университет, Россия, 634050, Томск, пр. Ленина 30

**НИ Томский государственный университет, Россия, 634050, Томск, пр. Ленина 36

E-mail: sharkeev@ispms.tsc.ru

Введение

В ИФПМ СО РАН совместно с НГИУВ (г. Новокузнецк) и СХК (г. Северск Томской обл.) разработаны современные конструкции внутрикостных дентальных имплантатов различных модификаций [1, 2] из наноструктурированного/ультрамелкозернистого (НС/УМЗ) титана BT1-0 [3 - 5]. Имплантаты из титана имеют преимущества перед широко используемыми имплантатами из титановых сплавов в части сокращения сроков, необходимых для остеоинтеграции, снижения вероятности отторжения имплантатов организмом. Они прошли успешно полный комплекс испытаний, включая клинические испытания в ведущих клиниках России, подтвердившие их хорошие эксплуатационные и функциональные качества [6].

При организации производства дентальных имплантатов из НС/УМЗ титана в связи с потребностью обеспечения высоких прочностных и усталостных характеристик изделий использование неразрушающих экспрессных методов механической оценки долговечности и надежности изделий весьма актуально. Формирование трещин при нагружении, в том числе усталостных трещин при циклическом нагружении в титане, является многостадийным процессом, связано с накоплением микрповреждений и локализацией пластического течения на мезоскопическом уровне. Целью работы было исследование эволюции температурного поля в процесс деформирования и разрушения образцов крупнокристаллического (КК) и НС/УМЗ титана и титанового сплава BT6.

Объекты и методы исследования

Для исследования закономерностей локализации пластической деформации и формирования трещин в процессе одноосного механического нагружения в процессе растяжения плоских образцов титана BT1-0 в работе применялась комплексная методика, позволяющая одновременно регистрировать во времени удлинение образца, прилагаемое усилие и распределение температуры по поверхности [7]. Для исследования были подготовлены стандартные образцы на растяжение из заготовок

титана BT1-0, наноструктурированных интенсивной пластической деформацией, а именно, комбинированным методом, включающем многократное одноосное прессование в интервале температур 773-673К со сменной оси деформации и многоходовую прокатку при комнатной температуре с последующим дорекристаллизационным отжигом при 573К [5], а также из титанового сплава BT6. Образец КК титана BT1-0 получали отжигом НС/УМЗ образца при температуре 1067К в течение одного часа и охлаждением с печью. Размеры образцов соответствовали требованиям к образцам прямоугольного сечения типа IV по ГОСТ 25.502-79. Нагружение образцов проводилось на испытательной машине Instron VHS 40/50-20, 50 кН. При растяжении образцов поддерживалась постоянная скорость деформации $6,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Регистрация усилий проводилось с помощью датчика DYNACELL с точностью 0,2 %.

Изменение температуры на поверхности образцов во времени регистрировалось в виде последовательностей инфракрасных (ИК) термограмм форматом 320x240 пикселей с помощью измерительной тепловизионной системы NEC Avio TH9100, Япония, модифицированной для исследования быстротекущих тепловых процессов [8]. Максимальная частота записи составляла 60 Гц, но, учитывая сравнительно медленное развитие процесса механического нагружения, в настоящем исследовании записывали 10 кадров в секунду. Температурная чувствительность тепловизионной установки достигала $0,06^\circ\text{C}$, причем, эта величина могла быть улучшена, по крайней мере, вдвое путем пакетного усреднения термограмм в последовательности, в результате чего снижались собственные шумы детектора ИК излучения.

Тепловизор устанавливали на расстоянии 0,4 м от образца при снятом защитном окне установки Instron, при этом поле зрения в плоскости образца составляло $17 \times 12,8 \text{ см}^2$ при размере пикселя 0,5 мм.

Программное обеспечение системы ИК контроля включало программу цифровой записи в режиме он-лайн на стандартный персональный компьютер типа лэп-топ, а также

специализированную программу ThermoFit Pro для обработки температурной информации в режиме оф-лайн. С момента разработки в 1990-х годах данная программа неоднократно модифицировалась за счет включения новых алгоритмов обработки динамических последовательностей, включающих до 3000 ИК термограмм различного формата. Объем исходной информации, представляемой в виде трехмерного вектора температурного сигнала, а также продолжительность обработки, зависят от используемого алгоритма и мощности компьютера. В настоящем исследовании анализировали последовательности, включающие от 200 до 600 изображений. Большинство опций программы ThermoFit Pro предназначено для выделения слабых девиаций температуры от некоей эталонной функции, которая описывает изменение температуры в бездефектных областях, что характерно для активного теплового неразрушающего контроля. Основными алгоритмами обработки «трехмерных» температурных сигналов являются: 1) фильтрация во времени и по пространству, а также усреднение во времени; 2) вычисление пиксельных функций дифференциального температурного сигнала, а также так называемого «текущего температурного контраста»; 3) полиномиальная аппроксимация; 4) модификация гистограммы отдельных изображений и статистический анализ; 5) Фурье- и вейвлет-анализ; 6) метод анализа главных компонент; 7) тепловая томография; 8) определение теплофизических характеристик материалов при одностороннем и двухстороннем тепловом контроле; 9) оценка коррозии плоских изделий при одностороннем доступе; 10) тепловая дефектометрия, то есть оценка поперечных размеров, глубины залегания и толщины

планарных дефектов в неметаллических композитах. Более подробное описание вышеуказанных алгоритмов можно найти в [8].

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В условиях активного нагружения образцов повышение температуры материала происходит в результате диссипации работы напряжений при пластической деформации. Скорость тепловыделения в материальной точке, может быть оценена с помощью соотношения $\dot{q} = 0.95 \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^p$, где σ_{ij} - компоненты тензора напряжения, $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ - компоненты тензора скорости пластической деформации. При локализации пластического течения в объеме деформируемого образца формируется неоднородное поле температуры. Данные об изменении температуры на поверхности деформируемого образца в процессе нагружения содержат ценную информацию о закономерностях локализации деформации и формировании области разрушения. Отметим, что, несмотря на изменение топологии температурного поля вследствие теплопроводности, регистрируемое распределение температуры на поверхности позволяют определить момент начала формирования макроскопической локализации деформации на стадии предразрушения.

Топология температурного поля на поверхности образцов из титана показана на рис. 1 в сравнении с образцом из сплава ВТ-6 (соответствие цвета и температуры на термограммах следует из приведенных шкал). Характерной особенностью сплава ВТ-6 является наличие узких полос повышенной температуры, расположенных перпендикулярно сечению разрушения (рис. 1а). В НС титане ВТ1-0 зоны

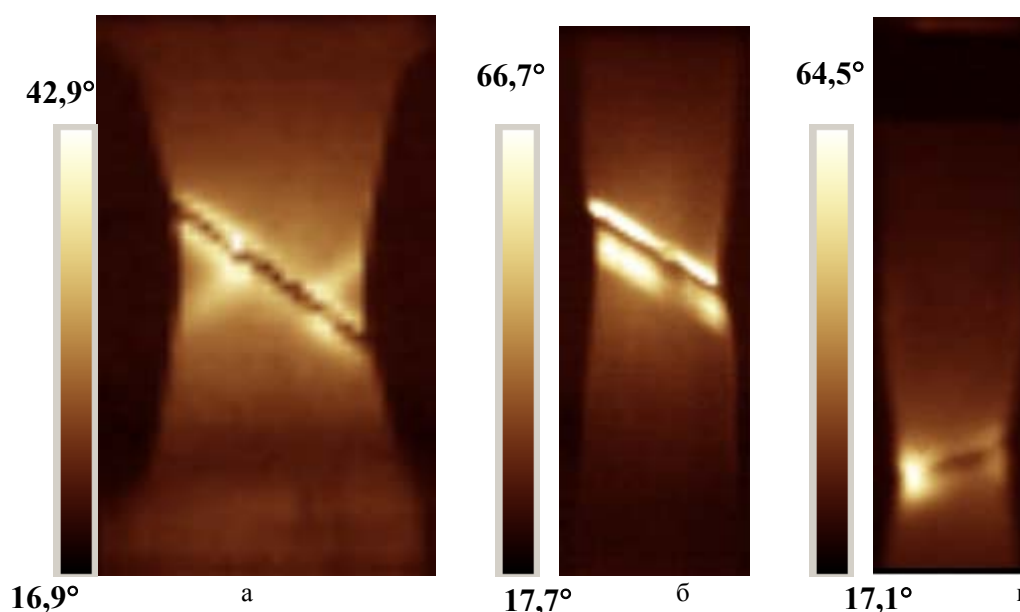


Рис. 1. Температурные поля в момент разрушения образцов из сплава ВТ-6 (а), НС/УМЗ титана (б) и КК титана (в)

максимальной температуры, а, следовательно, и очаги локализованной деформации и разрушения, расположены вдоль всего сечения разрушения (рис. 1б), в то время, как в КК титане, имеет место одиночный мощный очаг локализованной деформации и разрушения (рис. 1в).

Дополнительную информацию о характерных особенностях изменения температуры во времени может получить, используя специфические алгоритмы обработки нестационарных сигналов, в частности, реализованные в программе ThermoFit Pro. На рис. 2 показаны изображения главных компонент, полученные путем статистической обработки записанных последовательностей ИК термограмм. Известно, что метод анализа главных компонент позволяет заменить длинную последовательность динамических изображений несколькими изображениями, так называемых «главных компонент», которые содержат сгруппированную информацию об особенностях изменения температуры в отдельных пикселях. Из данных рис. 2 следует, что разрушение сплава ВТ-6 связано с образованием во времени нескольких локальных зон (рис. 2а), в НС/УМЗ титане «особые» зоны, то есть, по-видимому, зоны локализованной деформации, занимают значительную часть образца, в то время как в КК титане зона локализованной деформации достаточно однородна, но занимает также большую площадь.

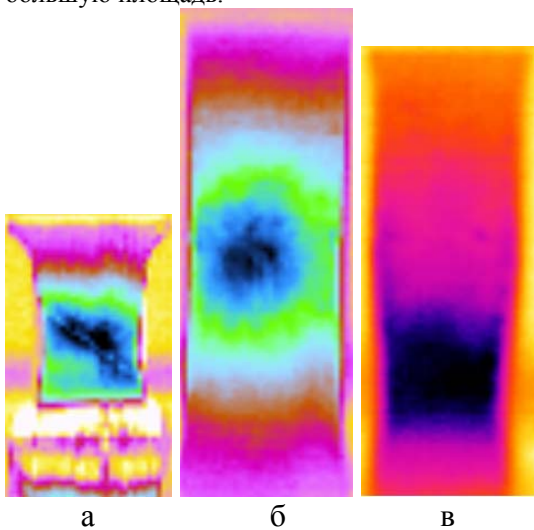


Рис.2. Результат обработки последовательностей ИК термограмм по методу анализа главных компонент для образцов из сплава ВТ-6 (а), НС/УМЗ титана (б) и КК титана (в)

Одной из целей исследования являлось сопоставление деформационных кривых, представленных на рис. 3 для НС/УМЗ титана и КК титана, и температурных профилей в характерных точках поверхности образцов вблизи зоны разрушения (рис. 4).

Анализ кривых деформации на рис. 3 показывает, что НС/УМЗ титан ВТ1-0 имеет в два

раза выше пределы текучести и прочности по сравнению с КК титаном. Они сопоставимы с характеристиками сплава ВТ6. Вместе с тем, величина предельной степени деформации до разрушения образцов НС/УМЗ титана при растяжении уменьшается в 2 раза. В НС/УМЗ титане пластическая деформация при заданной скорости деформации $6,5 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ начинается через 27 с после начала нагружения, шейка образуется через 40 с и разрушение происходит через 50 с. В КК титане характерные стадии деформации происходят соответственно при 20, 45 и 70 с.

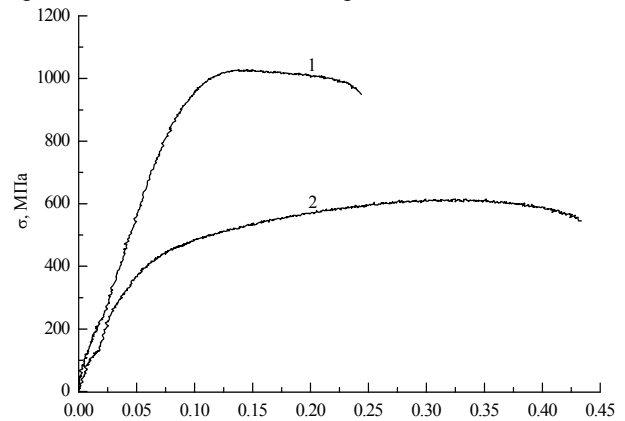


Рис. 3. Кривые деформации образцов из НС/УМЗ титана (кривая 1) и КК титана ВТ 1-0 (кривая 2)

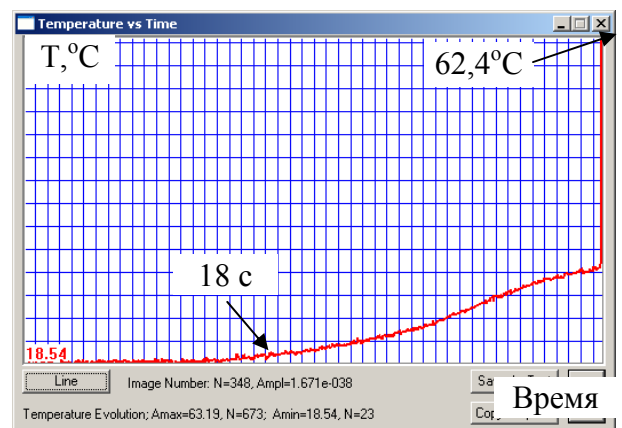
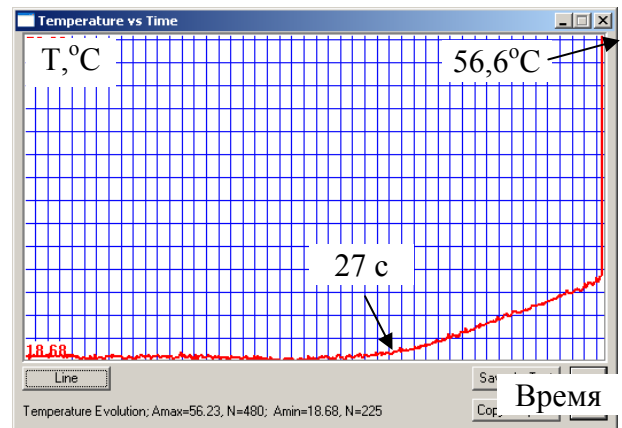


Рис. 4. Изменение температуры во времени в зонах с максимальной температурой разрушения: а – НС/УМЗ титан; б – КК титан

Изменение температуры образцов во времени также обнаружили существенные различия. В НС/УМЗ титане рост заметный линейный рост температуры начался через 27-29 с после начала нагружения, перед началом разрушения на стадии явной шейки максимальная температура образца составила 29,2°C (при начальной температуре 18°C), после чего скачкообразно выросла до 66,4°C в момент разрушения.

В КК титане температура начала расти через 18-20 с, перед разрушением темп роста температуры замедлился, по-видимому, вследствие установившейся пластической деформации, достигнув 32°C перед разрушением; непосредственно после разрушения температура составила 62,4°C.

Характер температурного поля в момент разрушения наглядно проявляется при вычислении производной от температурной кривой. Соответствующие ИК термограммы, фактически представляющие собой разность двух термограмм непосредственно до и после разрушения, то есть с интервалом времени 0,1 с, представлены на рис. 5. Изображения производных аналогичны обычным ИК термограммам, записанным в момент разрушения (см. рис. 1), следовательно, сам момент разрушения не вносит существенных изменений в топологию температуры.

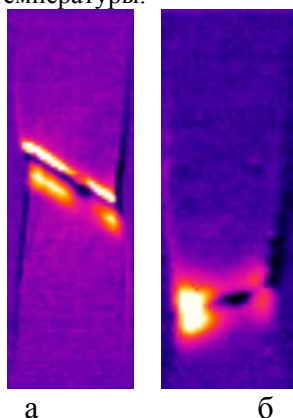


Рис. 5. Производная от температуры во времени в момент разрушения образцов из НС/УМЗ титана (а) и КК титана (б)

Заключение

1. Анализ ИК термограмм позволил установить, что характерной особенностью нагружения образца из сплава ВТ-6 является наличие узких полос повышенной температуры, расположенных перпендикулярно сечению будущего разрушения. В НС титане зоны максимальной температуры, а, следовательно, и очаги разрушения, расположены вдоль всего сечения разрушения, а в КК титане имел место одиночный мощный очаг разрушения.

2. В условиях квазистатического растяжения образцов пластическая деформация в КК титане

развивается более однородно в объеме по сравнению с НС титаном. Установлено, что в НС титане степень разогрева области, в которой формируется трещина выше, чем в КК аналоге.

3. Анализ полученных результатов показывает, что метод инфракрасной термографии может быть использован для изучения процессов развития пластических деформаций и повреждений в металлах, в том числе в НС/УМЗ состоянии.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке интеграционного проекта СО РАН, выполняемого со сторонними научными организациями, №126 и программы Президиума РАН, проект №7.2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РФ на изобретение № 2376955 (Опубл. 27.12.2009 Бюл.№ 36) Дентальный внутрикостный имплантат. Шаркеев Ю.П., Белявская О.А., Поленичкин В.К., Климентенко О.П., Фортуна С.В., Поленичкин С.В.

2. Патент РФ на полезную модель № 71537 (Опубл. 20.03.2008 Бюл.№8) Дентальный имплантат (варианты) Шаркеев Ю.П., Белявская О.А., Поленичкин В.К., Хлусов И.А., Фортуна С.В., Луконин С.Е.

3. Шаркеев Ю.П., Ерошенко А.Ю., Братчиков А.Д., Легостаева Е.В., Кукареко В.А. Структура и механические свойства наноструктурного титана после дорекристаллизационных отжигов. // Физическая мезомеханика –2005.-Т. 8. Спец выпуск. С.91-94.

4. Шаркеев Ю.П., Ерошенко А.Ю., Братчиков А.Д., Легостаева Е.В. Данилов В.И., Кукареко В.А. Объемный ультрамелкозернистый титан с высокими механическими свойствами для медицинских имплантатов. // Нанотехника – 2007. - №3(11) - С.81-88.

5. Ерошенко А.Ю., Шаркеев Ю.П., Толмачев А.И., Коробицын Г.П., Данилов В.И. Структура и свойства объемного ультрамелкозернистого титана, полученного abc-прессованием и прокаткой // Перспективные материалы. –2009. – Спец. Выпуск.№7. –С.107-112.

6. Шаркеев Ю.П., Поленичкин В.К., Белявская О.А. «Перспективы применения ультрамелкозернистого титана в дентальной имплантологии». Материалы международной научно-практической конференции «Состояние и перспективы трансплантологии», 8-10 октября 2008г. – Минск: Белорусская наука, 2008.-С.116-118.

7. Плехов О.А., Уваров С.В., Сантья Н., Пален-Лук Т., Наймарк О.Б. Исследование усталостного деформирования материалов с использованием метода инфракрасной термографии // Деформация и разрушение материалов, 2005, №11, С. 39-43

8. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. - М.: Спектр, 2009. С. 575.

СИСТЕМА ЕВРОПЕЙСКИХ СТАНДАРТОВ ПО РАДИОГРАФИЧЕСКОМУ КОНТРОЛЮ

Гнедин М.М., Галкин Д.И.

Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики,
105275, г. Москва, ул. 5-ой Соколиной горы, д.22

E-mail: abnya@mail.ru

Планы модернизации отечественного машиностроения, декларируемое вступление в ВТО и проекты совместных работ с зарубежными фирмами определяют необходимость освоения Европейских нормативных документов, устанавливающих требования к производству продукции.

Одно из направлений этой работы связано с неразрушающим контролем, устанавливающим соответствие продукции требованиям контракта (договора).

В докладе рассматривается система Европейских стандартов (EN) по радиографическому контролю (РК), широко используемому в промышленности.

Цель проведенной работы – создание справочно-информационного материала, предназначенного для использования:

- при подготовке и сертификации персонала радиационного контроля, работающего по EN;
- при организационно-технической подготовке производства, изготавливающего (монтирующего) оборудование по EN.

По результатам информационного поиска был составлен перечень стандартов EN и других нормативных документов, всего 28 шт, (из которых 8 распространяются на приборы и принадлежности) и относящихся к следующим направлениям:

- РК сварных изделий;
- РК труб и трубопроводов;
- РК отливок.

Для сравнения можно указать, что количество российских стандартов по радиационному контролю составляет 19 шт., из которых 13 распространяется на аппаратуру и приборы.

Радиационный контроль осуществляется в три основных этапа:

1. назначение метода, класса и объёма контроля;
2. разработка техпроцесса (техники) контроля, экспозиция;
3. оценка годности объекта контроля по критериям приёмки.

Сложившаяся к настоящему времени в РФ система нормативно-технической документации (включая ГОСТы) на проведение неразрушающего контроля носит отраслевой характер, поскольку требования по пп. 1, 3 и частично 2 определяются ведомственными документами.

Пример разработанной системы стандартов EN по радиографическому контролю интересен тем,

что за период становления Европейского Союза, объединяющего ~ 22 страны с различными отраслями, уровнем развития промышленности и своей национальной нормативно-технической базой, в созданной системе стандартов EN по радиографическому контролю была реализована единая уровневая система требований к качеству (классу) разнообразных объектов контроля, изложенная в виде конкретных показателей и жёстко регламентирующая соответствующие требования к техпроцессу и устанавливающая критерии приёмки. При этом состав и взаимодействие нормативных документов зависят от конкретных направлений и объектов контроля.

Рассмотрим действие этой системы применительно к перечисленным ранее направлениям.

1. РК сварных изделий

Представленная система стандартов EN по РК сварных изделий практически охватывает весь цикл производства изделия от его проектирования до изготовления и приёмки по результатам контроля (см. блок-схему взаимосвязи требований КД, условий контракта с требованиями стандартов EN по РК сварных соединений, рис.1).

В процессе проектирования на основе прочностных расчётов разработчик конструкторской документации (КД), используя данные стандарта ISO 6520-1 и руководствуясь требованиями стандарта EN ISO 5817(для стали, никеля и титана и их сплавов) или ISO 10042 (для алюминиевых сплавов), назначает уровень(и) качества сварных соединений (всего 3), тем самым устанавливая конкретные виды и размеры допускаемых несовершенств в будущих сварных изделиях.

Стандарт EN 12062 в табличной форме определяет взаимосвязь между назначенным в КД уровнем качества с требуемым уровнем (техникой) контроля и уровнем приёмки.

Для РК упомянутая таблица имеет следующий вид:

Таблица 1

Радиографический контроль (РК)

Уровни качества согласно EN ISO 5817 или ISO 10042	Уровни (техника) контроля согласно EN 1435	Уровни приёмки согласно EN 12517
B	B	1
C	B ¹	2
D	A	3

Указанная информация является одним из определяющих требований как при разработке технологии сварки (стандарты EN ISO 5817 или ISO 10042 применяются для установления более жёстких уровней приёмки, чем EN 12517 при контроле образцов), так и при выборе техники радиографии (выбор напряжения, класса плёночной системы, количества экспозиций, чувствительности метода и др.).

2. РК труб и трубопроводов

Система стандартов EN по радиографическому контролю труб и трубопроводов отличается от рассмотренной ранее системы стандартов EN по РК сварных изделий и распространяется на сварные соединения труб, выполненные автоматической электродуговой сваркой плавлением. В ней отсутствует требование уровня качества, но устанавливаются согласно стандарту EN 10246-10 два класса качества изображения. Требования к технике (уровню) контроля и критериям приёмки определяются спецификациями, кодами, техническими условиями и другими нормативными документами, оговоренными контрактом или соглашением сторон, и реализуются согласно блок-схеме взаимосвязи требований контракта (соглашения) и разделов части 10 стандарта EN 10246 (рис.2).

Необходимо отметить, что стандарт EN 10246-10 содержит как требования к технике (методике) контроля, так и критерии приёмки. Такой подход, опирающийся на полувековой опыт производства труб, свойственен российской и американской документации на этот сектор продукции.

3. РК отливок

Проведение радиографического контроля отливок связано с рядом особенностей, как самого объекта контроля, так и оценкой его результатов. Очень часто отливка представляет собой сложную пространственную деталь с большим перепадом толщин и различного рода отверстиями и полостями, что делает практически невозможным и экономически нецелесообразным проведение её 100% контроля.

Поэтому объём РК отливок, используемая техника контроля и оценка результатов во многом определяются условиями контракта (соглашения). Оценка качества по результатам контроля отливок отличается от распространённого количественного принципа (определение размеров несовершенств, их количества, площади) и заключается в использовании принятой в США качественной оценки полученного изображения.

При этом изображение выявленного несовершенства зрительно сравнивается с определённым в контракте (соглашении) ссылочным радиографическим снимком несовершенства того же вида с допустимой конфигурацией (плотность распределения на заданной площади, максимальные размеры и др.),

представленном в соответствующем альбоме «Ссылочных радиографических снимков ASTM». Блок-схема взаимосвязи условий контракта с требованиями стандартов EN по РК стальных отливок приведена рис.3.

По результатам проведенной работы разработано и издано справочно-информационное пособие «Радиографический контроль в системе стандартов EN».

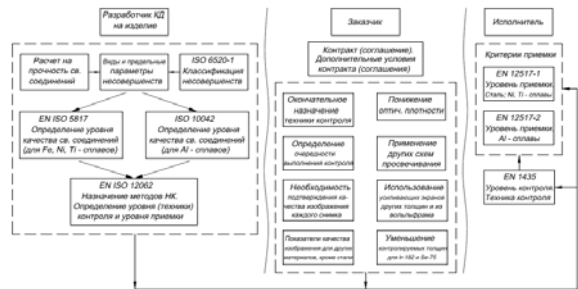


Рис.1 Блок-схема взаимосвязи требований КД, условий контракта (соглашения) с требованиями стандартов EN по РК сварных соединений



Рис.2. Блок-схема взаимосвязи условий контракта с требованиями стандарта EN по РК труб и трубопроводов



Рис. 3. Блок-схема взаимосвязи условий контракта с требованиями стандартов EN по РК отливок

О ТЕОРЕТИКО-ГРУППОВОЙ ТРАКТОВКЕ ПОНЯТИЯ «ДЕФЕКТ»

Баранов В.А., Эверт У.*

Институт неразрушающего контроля, Томский политехнический университет

*Bundesanstalt für Materialforschung und prüfung, г. Берлин, Германия

E-mail: ram1@mail.tomsknet.ru

На основе развитых авторами статистических структурно-ориентированных методов пространственной фильтрации изображений предложен теоретико-групповой подход к трактовке понятия «дефект». Локальная группа Ли в теоретико-групповых фильтрах использована в качестве инструмента для определения структурной нормы контроля. Рассмотрены методы распознавания аномальных структурно-функциональных связей в объекте контроля и формирования его карты дефектности.

Структурная норма и структурно-функциональные связи в объекте контроля

Структурно-ориентированный подход к проблемам неразрушающего контроля (НК) [4-7] дает возможность уточнить понятие «дефект». Структура - это целое, устойчивое относительно определенных внешних и внутренних изменений. В теоретико-групповых статистических методах обработки изображений [5,6,7] они формально задаются группой автоморфизмов реконструируемого объекта [1]. Решение реконструктивной задачи основывается на статистической оценке структурных инвариантов объекта, что, в свою очередь позволяет выявлять структурно-функциональные связи в нем.

На макро- и мезоуровне дефект занимает какую-то конечную окрестность точки $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{1A})$ конфигурационного пространства S_C контролируемого объекта, в более конкретном варианте - окрестность точки (x, y, z) контролируемого «изделия». Дефект это коллективное явление, вовлекающее во взаимодействие всю окрестность, поэтому естественно рассматривать его как особое состояние этой микрообласти, в которой структурно-функциональные связи, характерные для «фона» объекта, нарушаются. В силу данных обстоятельств среди разработанных авторами структурно-ориентированных методов и программных инструментов для распознавания и оценки дефектов более всего подходят алгоритмы пространственной фильтрации изображений с локальной группой Ли L_S , определяющей фон итогового изображения [5,6]. В данном случае теоретико-групповые преобразования применяются к локальным микроизображениям внутри скользящего окна. Интенсивность итогового изображения для его элемента, соответствующего центральному элементу окна, строится на оценке взаимодействия микроизображения с теоретико-групповым фильтром как степени понижения симметрии

микроизображения в сравнении с симметрией фона.

Алгоритм основан на проверке гипотезы о совпадении локальной симметрии фона и изображения в окрестности произвольной точки $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{1A})$. Пониженная (существующая в отличие от L_S «объективно») симметрия описывается какой-то другой группой L_O . Содержательность итогового изображения достигается разницей симметрий L_S и L_O . Для ее количественной оценки сконструируем неотрицательную «меру различия»

$$\Phi = \Phi(L_S, I_O, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{1A}) \quad (1)$$

Во «вторичном изображении» (1) представлены как инвариантные, так и неинвариантные (относительно L_S) свойства объекта (т.е. фон или «норма» с $\Phi = 0$ и «аномалии» с $\Phi > 0$), причем одновременное их присутствие принципиально необходимо. Мера (1) является, вообще говоря, нелинейным функционалом исходного изображения I_O . При этом группа L_O обычно не входит явно в (1) в качестве аргумента

В теоретико-групповой нулевой гипотезе с группой L_S заложено представление исследователя о «структурной норме», характерной для восстанавливаемого объекта, которое и используется затем в реконструктивном алгоритме. «В действительности пространство аморфно, и форму ему сообщают те вещи, которые в нем находятся» (А. Пуанкаре, «Наука и метод»). Смысл группы L_S в том, что она устанавливает «нормальные» структурно-функциональные связи между «вещами», которые находятся в пространстве в окрестности центра микроизображения, тем самым придавая ему форму. Для другой нормы, нацеленной на другой тип объекта, задаваемый другой группой L_S возникает и другая форма пространства. Разумеется, при столкновении с опытом структурная норма не «обязана» выполняться на 100%. Напротив, ценнейшую информацию дают именно отклонения от нее. В результатах проверки должен содержаться элемент неожиданности (т.е. возможность ответов и типа «да», и типа «нет»), иначе диагностика бессмысленна. Это позволяет во «вторичных изображениях» типа (1) визуализировать только лишь аномальные структурно-функциональные связи, тогда как «нормальные», поглощаются фоном и остаются невидимыми.

В конкретных статистических алгоритмах группа L_S заменяется своей конечной подгруппой и строится статистика F , аналогичная мере различия (1), которая используется затем в качестве распределения яркостей итогового изображения. Например, для распознавания локальной анизотропии на основе дисперсионного анализа в качестве L_S фигурирует группа SO (2) и в качестве F – дисперсионное отношение Фишера. Статистический подход позволил преодолеть «жесткость» классического теоретико-группового анализа и приспособить его аппарат для решения синтетических задач [3,2].

Составная теоретико-групповая гипотеза и карта дефектности

В задачах структурно-ориентированной дефектоскопии, основанных на распознавании локальной диссимметрии, полезно сконструировать параметрическую группу локальной симметрии L_C ($\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{1A}$), конфигурационного пространства S_C , которое может быть или евклидовым пространством, или же многообразием. Группа L_C ($\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{1A}$) совпадает с группой L_S если $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{1A}$ – координаты «центрального элемента» в S_C .

Косвенная информация о микрообласти представлена исследователю локальным микроизображением в окрестности точки ($\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{1A}$). Далее, если в какой-то области объекта контроля (например, во всем объекте) нулевая статистическая теоретико-групповая гипотеза с локальной группой L_S (по другому с $L_C(x,y,z)$) выполняется с заданным уровнем значимости ε «равномерно», т.е. для всех без исключения точек области как «центральных элементов» микрообластей, то эта область считается бездефектной. Иными словами, в бездефектной области выполняется «составная» нулевая гипотеза с группой $L_C(x,y,z)$. Альтернативная гипотеза заключается в том, что в области есть, по крайней мере, один дефект, который интерпретируется как «невырожденное» состояние микрообласти, а статистика F дает ему количественную оценку. Бездефектная же зона трактуется как массив «вырожденных» состояний микрообластей. По результатам проверки составной гипотезы генерируется карта дефектности объекта в форме обычного двумерного ($F = F(x,y)$) или же многомерного ($F = F(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{1A})$) изображения.

Информационная избыточность структурно-функциональных связей и их статистическая поддержка

В отличие от «материальных» характеристик объекта контроля типа «коэффициента линейного ослабления рентгеновского излучения» $\mu(x, y, z)$, возможность восстановления которых становится призрачной уже при относительно слабой некорректности исходной задачи реконструкции, структурно-функциональные связи объекта весьма

устойчивы. К тому же, именно они наиболее важны для решения большинства практических проблем.

Информационная избыточность тесно связана с «вырождением», т.е. с наличием внутренних скрытых симметрий в объекте контроля, что позволяет организовать *статистическую поддержку* «релевантным» структурно-функциональным связям, в частности такому свойству как «быть дефектом» в структурно-ориентированной дефектоскопии. Статистическая поддержка результатов диагностики в общем и целом тем эффективнее, чем глубже «вырождение» т.е. чем богаче ключевая группа. (В локальных вариантах структурно-ориентированной обработки изображений это представлено группой L_S).

Теоретико-групповая статистическая фокусировка информации в алгоритмах реконструкции

В методах классического структурного анализа, где группа симметрии положена в основу классификации объектов, «нерелевантная» (не относящаяся к делу) исходная информация отсекается. Например, при теоретико-групповой классификации различных геометрий все углы (как и все стороны) треугольника в аффинной геометрии «объясняются» равными. Такой прием освобождения от «излишних подробностей» часто оказывается полезным для «смысловой фильтрации» информации. Это один из элементов абстрагирования.

В статистических теоретико-групповых методах классификации объектов (одним из которых является фильтрация изображений) исходная информация используется экономнее и эффективнее. Она статистически «фокусируется», причем своеобразной «оптикой» для этого служит ключевая группа преобразований. «Фокусировка» направлена на четкое выделение какого-то одного элемента реконструкции (или группы совместимых элементов), тогда как другие («дополнительные») элементы остаются неопределенными. Она осуществляется на основе параметрической группы (например, $L_C(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{1A})$ в алгоритмах с локальной группой). В методах нелинейного томосинтеза [4] реконструкция отдельного сечения с глубиной залегания Z осуществляется, по сути дела, также за счет теоретико-групповой фокусировки проекционной информации на основе двухпараметрической транзитивной группы

Структурно-ориентированная и «структурно-адаптивная» реконструкция

Широко распространены «адаптивные» алгоритмы реконструкции (их параметры зависят от характеристик объекта контроля). В «структурно-адаптивной» реконструкции сам термин «структура» понимается в обыденном смысле как «строение». В данных алгоритмах не

идет речь об оценке структурных инвариантов. При использовании «адаптивных» методов в задачу вносится множество полуэмпирических характеристик объекта. Напротив, структурно-ориентированные методы позволяют компактно описать структурный тип объекта на основе группы преобразований и осуществить для него реконструкцию, в принципе не прибегая к «полуэмпирическому подходу». Тем не менее, в науке лишь очень редкие задачи могут быть решены «из первых принципов» и на практике полуэмпирические параметры все же приходится вводить. Но, во всяком случае, структурно-ориентированные методы позволяют резко ограничить их число. К таким параметрам относятся, например, полуширина окна в алгоритмах структурно-ориентированной пространственной фильтрации.

Результаты и выводы

На основе развитого авторами теоретико-группового статистического подхода для решения реконструктивных задач обработки изображений и предложенных ими методов пространственной фильтрации изображений, основанных на проверке статистической гипотезы о «локальной симметрии» микроизображения в скользящем окне рассмотрена новая трактовка понятия «дефект»

Предложенные методы обладают рядом существенных преимуществ, среди которых следует отметить их гибкость, а также высокую эффективность как при реконструкции предельно зашумленных изображений, так и при теоретико-групповом статистическом распознавании по ним дефектов объектов контроля. Они регулярно используются в практике НК, в частности для диагностики строительных конструкций и для визуализации зон формирования трещин в компонентах работающих атомных электростанций в процессе их работы. По мнению авторов, сфера применения указанных методов в НК будет расширяться. Особенно перспективно их применение на стыке дефектоскопии и материаловедения. Потенциальная сфера их приложений за пределами НК также представляется широкой, но ее границы в настоящий момент трудно определить.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вейль Г., Классические группы, их инварианты и представления. // М.: Иностранная литература, 1947 – 408 с
2. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа // М: Наука, 1981 . – 487 с.
3. Бордовский Г. А., Кондратьев А.С., Чоудери А.Д.Р. Физические основы математического моделирования // М: Академия, 2005 . – 320 с.
4. Ewert U., Baranov V., Borchard K. Cross-sectional imaging of building elements by new non-linear tomosynthesis technique using imaging plates and Co⁶⁰ radiation // NDT & E International, Elsevier Science Ltd. – 1997. – V. 30. – № 4. – P. 243–248.
5. Баранов В.А., Бразовский В.В., Эверт У., Редмер Б. Структурно-ориентированная визуализация зон образования трещин в компонентах атомных электростанций // Естественные и технические науки, № 5, 2010, стр. 386-391.
6. Баранов В.А., Бразовский В.В., Ивженко О.О., Эверт У. Структурно-ориентированный подход к обработке изображений // Естественные и технические науки, № 5, 2010, стр. 407-413.
7. Баранов В.А., Бразовский В.В., Кулешов В.К., Эверт У. Нелинейные структурно-ориентированные методы обработки изображений // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, №3, 2011, стр.91-94.

МАГНИТНЫЙ ВЗАИМОИНДУКТИВНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ БИЕНИЙ ИЗМЕРИТЕЛЯ НЕСООСНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Алимов Д.В., Вахрушев Д.В., Гольдштейн А.Е.

Институт неразрушающего контроля Национального исследовательского Томского
политехнического университета, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: algol@tpu.ru

Исследована возможность использования взаимноиндуктивного преобразователя в качестве измерительного преобразователя биений круглой цилиндрической поверхности в измерителе несоосности сварных соединений. На основе результатов физического и математического моделирования взаимодействия магнитного поля преобразователя с ферромагнитной поверхностью осуществлен выбор оптимальных конструктивных параметров преобразователя, оценено влияние краевого эффекта.

Магнитные взаимноиндуктивные преобразователи нашли широкое применение для измерения толщины немагнитных покрытий на ферромагнитном основании. Относительная погрешность измерения магнитных толщиномеров, в которых используются такие преобразователи, не превышает нескольких процентов в диапазоне измерений от нуля до нескольких миллиметров [1, 2].

Родственной задаче измерения толщины покрытий является задача измерения биений круглой цилиндрической поверхности, возникающая при контроле соосности сварных соединений стальных буровых труб с приваренными замками. Конструктивно такие трубы состоят из трех элементов: тела трубы и двух замков – муфты и ниппеля, приваренных к телу трубы методом сварки трением. Соосность приваренных замков и тела трубы является важной характеристикой буровых труб, в значительной мере определяющей трудоемкость и точность бурения, срок службы бурового оборудования.

В соответствии с [3] контроль соосности заключается в измерении при вращении трубы радиальных биений замковой части трубы относительно оси тела буровой трубы в двух сечениях, первое из которых расположено вблизи сварного соединения, а второе – вблизи торца замковой части трубы. По результатам измерений определяются параллельное и угловое отклонения от соосности.

Измерение радиальных биений осуществляется с использованием стрелочных индикаторов часового типа [3] либо цифровых индикаторов с возможностью передачи данных на персональный компьютер [4]. И в том и в другом случае при измерении биений необходим постоянный контакт измерительного штока преобразователя с поверхностью объекта контроля, что вызывает износ наконечника штока, ограничивает надежность измерителя, определяет повышенные

требования к подготовке поверхности объекта контроля. В связи с этим возникла задача замены контактных преобразователей биений на бесконтактные, в качестве которых могут быть использованы магнитные взаимноиндуктивные преобразователи (МВИ), хорошо зарекомендовавшие себя при использовании в магнитных толщиномерах.

На рис. 1 схематично показана конструкция взаимноиндуктивного преобразователя биений.

Составными элементами преобразователя являются обмотка возбуждения w_1 , измерительная

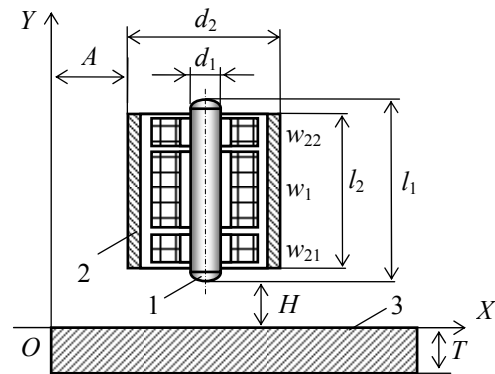


Рис. 1. Конструкция взаимноиндуктивного преобразователя биений

обмотка с двумя встречно включенными секциями w_{21} и w_{22} , а также ферромагнитный сердечник 1 и ферромагнитный цилиндрический экран 2, образующие магнитную цепь преобразователя. Практически неиспользуемый в аналогичных по назначению и конструкции преобразователях магнитных толщиномеров цилиндрический экран необходим в данном случае для исключения влияния находящихся в окружении преобразователя металлических деталей (например, элементов крепления).

В отсутствие вблизи преобразователя ферромагнитных объектов выходное напряжение измерительной обмотки равно нулю, что обусловлено равенством по модулю потокоцепления магнитного поля обмотки возбуждения и встречно включенных секций измерительной обмотки.

При наличии вблизи торцевой части преобразователя ферромагнитного объекта 3 происходит перераспределение магнитных потоков через секции измерительной обмотки, что приводит к появлению напряжения разбаланса (вносимого напряжения) U_2 измерительной обмотки. Это напряжение функционально связано

с расстоянием H до поверхности объекта нелинейной функцией преобразования $U_2(H)$. Степень нелинейности функции преобразования определяется конструктивными параметрами преобразователя.

Другим фактором, влияющим на значение напряжения U_2 , является расстояние A до края ферромагнитного объекта (рис. 1). Существенное влияние данного фактора при использовании предлагаемого преобразователя для контроля соосности обусловлено конструктивными особенностями замковой части бурильной трубы, заключающимися в относительно малом расстоянии от торца замка до прорезей под ключ и, следовательно, в необходимости проведения контроля в условиях потенциально возможного проявления краевого эффекта.

В соответствии с вышесказанным, основными критериями при выборе конструктивных параметров взаимдуктивного преобразователя – длины и диаметра сердечника l_1 и d_1 , длины и диаметра экрана l_2 и d_2 , диаметра среднего витка обмоток d_0 , являлись степень нелинейности функции преобразования $U_2(H)$ и степень влияния на результат преобразования расстояния A преобразователя до края объекта.

Для анализа влияния на функцию преобразования основных факторов был использован пакет моделирования COMSOL Multiphysics, позволяющий решать задачи, в том числе, из области электромагнетизма путем численного решения уравнений в частных производных методом конечных элементов. Построенная трехмерная модель преобразователя позволила осуществить анализ влияния на его функцию преобразования, как основных конструктивных параметров, так и оценить влияние на результаты преобразования краевого эффекта.

В качестве примера на рис. 2 показана рассчитанная с помощью COMSOL топография магнитного поля преобразователя при взаимодействии с плоским объектом при удалении от края объекта и вблизи края. Для расчетов использовались стандартные процедуры 3D моделирования магнитного поля магнитной системы рис. 1. При этом принималось, что ряд параметров МВП имеют фиксированные значения: относительная магнитная проницаемость всех ферромагнитных элементов $\mu_r = 100$; высота, наружный и внутренний диаметры обмотки возбуждения равны соответственно 11 мм, 15 мм и 7 мм; диаметр среднего витка измерительной обмотки и обмотки возбуждения равен $d_0 = 11$ мм. Значения остальных влияющих параметров варьировались в процессе моделирования. При этом определялись значения обусловленного наличием ферромагнитного объекта относительного

приращения магнитного потока Φ^* через средние витки секций измерительной обмотки:

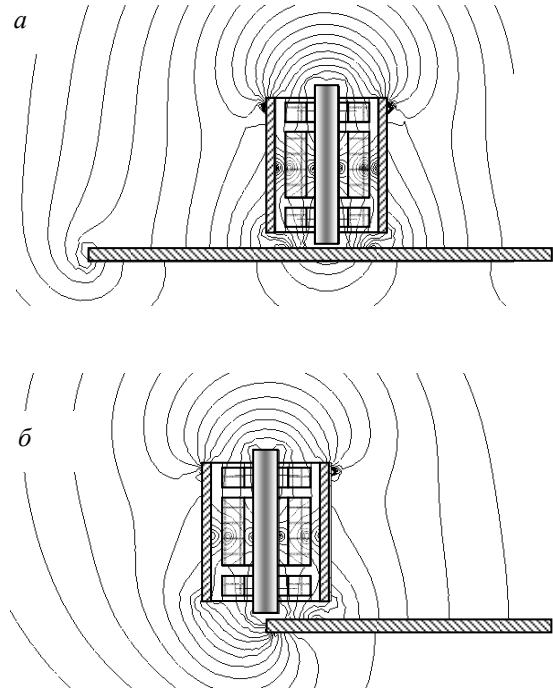


Рис. 2. Линии одинаковой индукции магнитного поля МВП при взаимодействии с плоским объектом при удалении от края объекта (а) и вблизи края (б)

$$\Phi^* = \frac{\Phi_{21} - \Phi_{22}}{\Phi_0}, \quad (1)$$

где Φ_{21} и Φ_{22} – значения магнитных потоков через средние витки соответствующих секций измерительной обмотки при наличии ферромагнитного объекта; Φ_0 – значение магнитных потоков через средние витки секций измерительной обмотки при отсутствии ферромагнитного объекта.

Относительное приращение магнитного потока Φ^* для МВП с сосредоточенными секциями измерительной обмотки равно относительному вносимому напряжению U_2^* измерительной обмотки:

$$\Phi^* = U_2^* = \frac{U_2}{U_0}, \quad (2)$$

где U_0 – начальное напряжение секции измерительной обмотки.

С допустимой степенью приближения можно принять, что и для МВП рис. 1 с распределенными секциями измерительной обмотки справедливо равенство (2) и функция преобразования $U_2^*(H)$ совпадает с функциональной зависимостью $\Phi^*(H)$. Расчет значения магнитного потока через поверхность заданного контура является

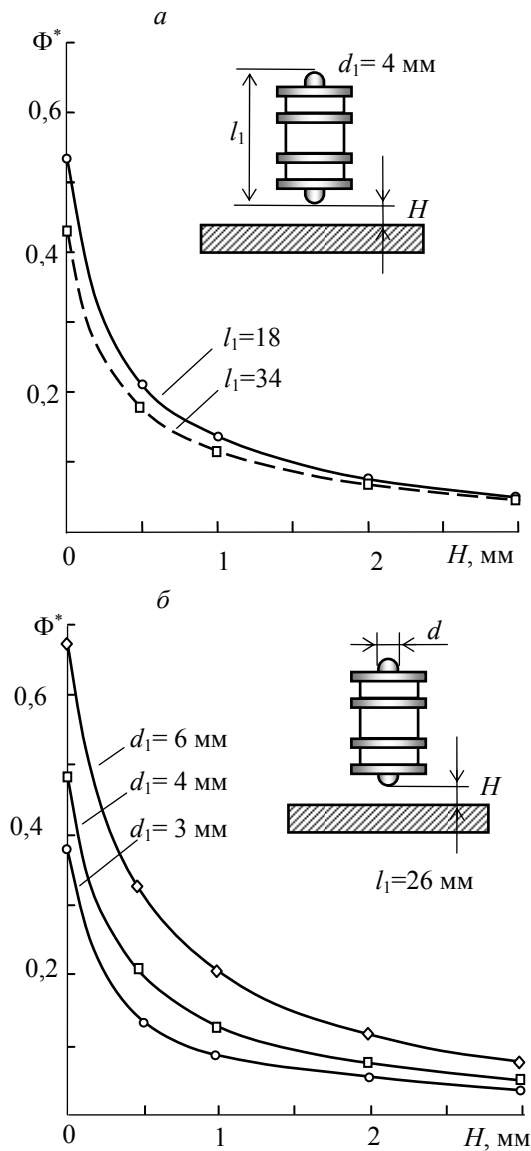


Рис. 3. Зависимость функции преобразования МВП от длины (а) и диаметра (б) сердечника

стандартной процедурой, выполняемой программой COMSOL.

На рис. 3 представлены результаты численного моделирования влияния длины и диаметра ферромагнитного сердечника МВП при отсутствии цилиндрического экрана. Анализ этих результатов показывает, что удлинение сердечника приводит к некоторому уменьшению нелинейности функции преобразования за счет небольшого понижения чувствительности для малых зазоров (рис. 3а). Однако этот путь коррекции функции преобразования имеет ограниченное использование по причине существенного увеличения габаритов преобразователя. Радикальным способом увеличения сигнала преобразователя при больших зазорах является увеличение диаметра сердечника (рис. 3б). Для рассматриваемого диапазона изменения диаметра можно ориентировочно

принять, что при увеличении диаметра сердечника наблюдается пропорциональное увеличение относительного вносимого напряжения преобразователя. При этом несколько уменьшается степень нелинейности его функции преобразования.

Рис. 4 иллюстрирует зависимость функции преобразования от наличия и длины цилиндрического экрана.

Анализ приведенных результатов показывает, что наличие экрана несколько повышает относительное вносимое напряжение преобразователя при малых зазорах, но при этом увеличивается и степень нелинейности функции преобразования (рис. 4а). Однако это увеличение может быть минимизировано уменьшением длины экрана по сравнению с длиной сердечника на (15÷25) %. На рис. 4б показан характер функции преобразования при оптимально подобранном

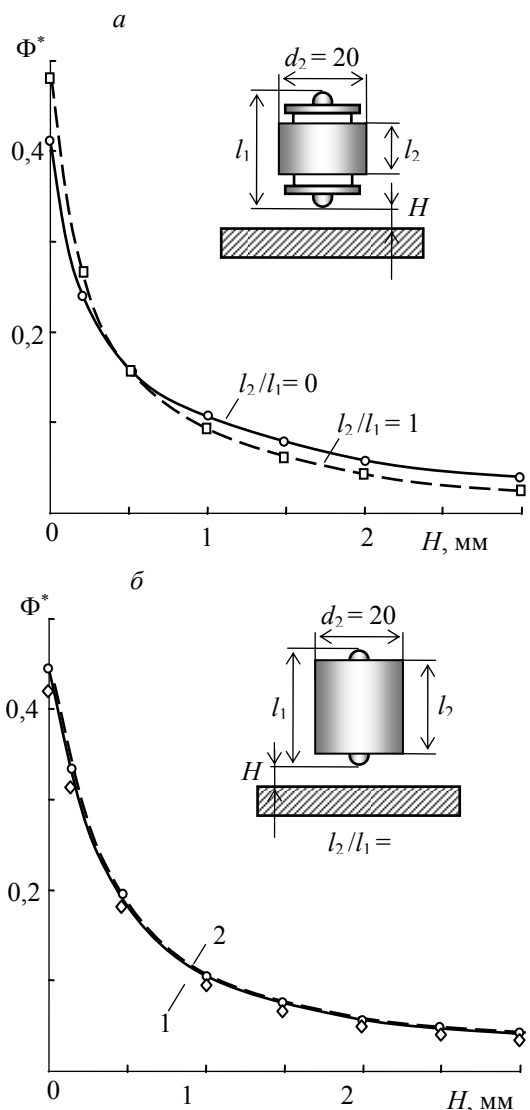


Рис. 4. Зависимость функции преобразования МВП от длины экрана (а) и ее вид для оптимального соотношения длины экрана и сердечника (б)

соотношении длины экрана и сердечника $l_2/l_1 = 0,8$. На этом рисунке приводятся зависимости, полученные в результате численного моделирования (кривая 1) и экспериментально (кривая 2). Их сравнение показывает достаточно высокую степень совпадения результатов математического и физического моделирования. В частности, отличие расчетного и экспериментального абсолютных значений магнитного потока Φ_0 не превышает 10 %.

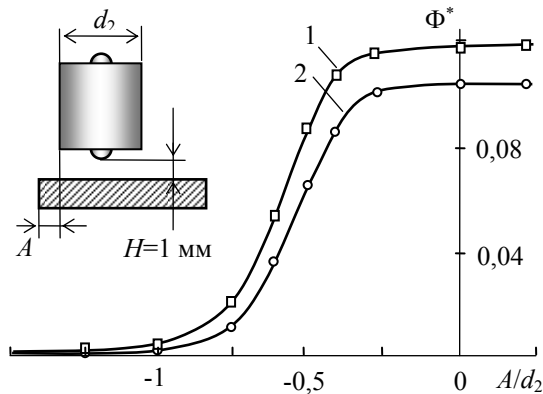


Рис. 5. Зависимость сигнала МВП от расстояния до края объекта

Как отмечалось ранее, применительно к решаемой задаче важным фактором, определяющим надежность контроля, является степень влияния на результат преобразования расстояния преобразователя до края объекта. На рис. 5 приводятся результаты моделирования краевого эффекта. Здесь представлены зависимости относительного вносимого магнитного потока Φ^* при зазоре $H = 1$ мм от

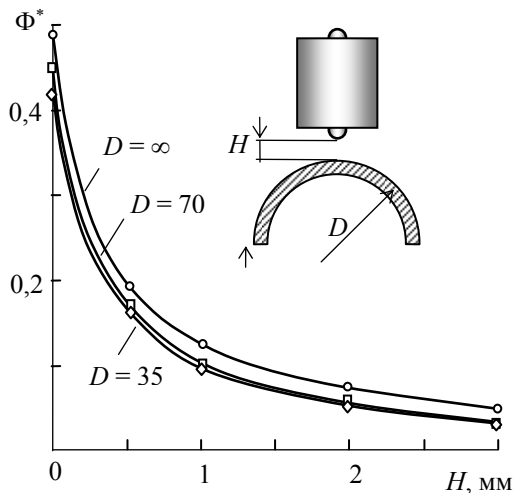


Рис. 6. Зависимость функции преобразования МВП от кривизны поверхности ферромагнитного объекта

расстояния A до поверхности объекта при отсутствии экрана (кривая 1) и при наличии экрана (кривая 2). Анализ этих результатов

показывает, что для используемой конструкции преобразователя краевой эффект проявляется незначительно даже при установке преобразователя на самый край объекта.

Кроме оценки влияния на функцию преобразования МВП основных конструктивных параметров исследовалось влияние на результаты контроля кривизны поверхности ферромагнитного объекта. Для этого в магнитной системе рис. 1 плоский ферромагнитный объект был заменен ферромагнитной трубой с наружным диаметром D . На рис. 6 иллюстрируется зависимость функции преобразования от диаметра трубы.

Анализ этих результатов показывает, что с увеличением диаметра трубы (возрастанием кривизны поверхности) сигнал преобразователя существенно уменьшается. Это требует выполнения калибровки для каждого типоразмера контролируемых труб.

Результаты моделирования, представленные на рис. 3 – рис. 6, позволили определить оптимальные для решения поставленной задачи контроля соотношения конструктивных параметров преобразователя – длины и диаметра сердечника l_1 и d_1 , длины и диаметра экрана l_2 и d_2 , диаметра среднего витка обмоток d_0 :

$$\begin{aligned} l_1 &= (1,5 \div 2,5) d_0; & d_1 &= (0,3 \div 0,4) d_0; \\ l_2 &= (0,75 \div 0,85) l_1; & d_2 &= (1,8 \div 2) d_0. \end{aligned} \quad (3)$$

Анализ результатов математического и физического моделирования магнитного взаимноиндуктивного преобразователя показал, что при его использовании в качестве преобразователя биений могут быть достигнуты метрологические параметры, сопоставимые с достигаемыми при использовании контактных цифровых индикаторов при гораздо более высоких эксплуатационных характеристиках. Определены оптимальные соотношения конструктивных параметров преобразователя с точки зрения линейности функции преобразования, оценено влияние на результаты контроля краевого эффекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Неразрушающий контроль. Справочник / под ред. В.В. Клюева: в 8 томах. Т 6: в 3-х кн.: Кн. 1: Магнитные методы контроля. Кн. 2: Оптический контроль. Кн. 3: Радиоволновой контроль. – М.: Машиностроение, 2006. – 848 с.
2. Web-сайт Elcometer Instruments Ltd (Англия). URL: <http://www.elcometer.com> (дата обращения: 15.04.2011).
3. ГОСТ Р 51245-99 «Трубы бурительные стальные универсальные. Общие технические условия».
4. Гольдштейн А.Е., Якимов Е.В. Измерение отклонения от соосности сварных соединений бурительных труб. – Ползуновский вестник, 2010, № 2, с. 65–69

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЦИФРОВОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ ДЛЯ ТОЛЩИНОМЕТРИИ ТРУБОПРОВОДОВ

Алхимов Ю.В., Завьялкин Ф.М., Санникова Е.А.

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: alkhimov@tpu.ru

Для восстановления пораженных коррозией оборудования и конструкций ежегодно расходуется не менее 10% продукции мирового металлургического производства. Очень остро вопросы контроля утонения стенок трубопроводов в результате коррозии стоят в нефте- и газодобывающей отрасли. Проникновение в результате коррозии газа, нефти и других продуктов в окружающую среду приводит не только к материальным потерям, но и к угрозе жизнеобеспечения человека и природы. Обычно для выявления коррозии используется ультразвуковой метод контроля. Однако он требует непосредственного контакта с металлом, поэтому возникает необходимость снимать защитное покрытие с трубы. Подчас такой контроль требует немало времени и финансов. В этом случае более простым методом контроля, который не требует операции удаления защитного покрытия, является радиографический метод. Однако традиционный метод радиографии требует использования рентгеновской пленки, что не всегда удобно в полевых условиях и для постоянного мониторинга за состоянием трубопровода. В настоящее время широкое распространение получил метод цифровой рентгенографии с использованием фосфорных пластин. Метод цифровой радиографии обладает рядом преимуществ по отношению к пленочной радиографии. Он сочетает достоинства радиографии и рентгенотелевидения. Это, с одной стороны, присущие рентгенотелевидению оперативность контроля, электронная обработка и архивирование изображений, исключение расходных материалов и процессов химической обработки, а с другой стороны - возможности исследования объектов любой конфигурации и неограниченных габаритов, а также приближения приемника излучения вплотную к объекту, как при съемке на пленку. Проведение неразрушающего контроля трубопроводов с использованием цифровой радиографии позволило бы снизить риск развития коррозии под изоляцией.

Возможность применения радиографии для толщинометрии поперечного сечения трубопроводов основана на особенности изменения толщины Z материала трубы в направлении просвечивания. Эта особенность состоит в том, что на координате, соответствующей толщине стенки S трубы,

функция Z имеет точку перегиба и максимальна

$$\text{при } Z_{\max} = 2\sqrt{S(D_n - S)}, \quad (1)$$

где D_n – наружный диаметр трубы.

Такое резкое изменение толщины материала в направлении просвечивания фиксируется на радиографическом снимке в виде значительного изменения плотности почернения. После экспонирования пленки с последующей её фотопроцессировкой на снимке получают увеличенное изображение профиля стенки трубопровода S - хорошо различимую на снимке полосу с изменяющейся оптической плотностью почернения от максимума на границе профиля стенки со стороны наружной поверхности трубопровода до минимума, который соответствует границе внутренней поверхности трубы (Рис. 1).

Схема просвечивания профильной толщинометрии состоит в том, что источник излучения (гамма-дефектоскоп, рентгеновский аппарат) и прямая плоская кассета с пленкой должны располагаться относительно контролируемого трубопровода таким образом, чтобы центральный луч рабочего пучка излучения был направлен перпендикулярно профилю стенки на контролируемом участке трубопровода (приблизительно по касательной к наружной поверхности трубы).

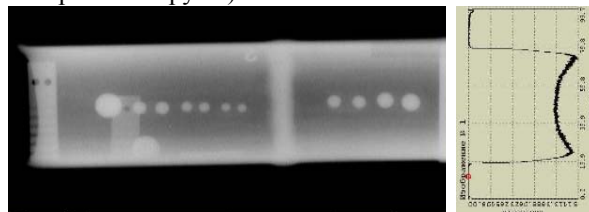


Рис.1. Радиографический снимок трубы

Для исследования мы использовали рентгеновский аппарат РУП-150/300-10-1, сканер HD-CR35 NDT для проявления изображения, фосфорные запоминающие пластины Kodak SO-170, Fuji, Düg и программу «ВидеоРен» для обработки изображения.

Так как измерение необходимо проводить с высокой точностью (для промышленных целей точность должна составлять 0,2-0,5мм), то к системе детектирования и обработки предъявляются следующие требования:

- широкий динамический диапазон (у пленок аналогичный параметр называется фотографической шириотой);

- высокое разрешение получаемого изображения;
- возможность его математической обработки впоследствии.

Нами исследован динамический диапазон пластин Fuji и Kodak SO-170. По результатам исследования были построены характеристические кривые детекторов (рис.2).

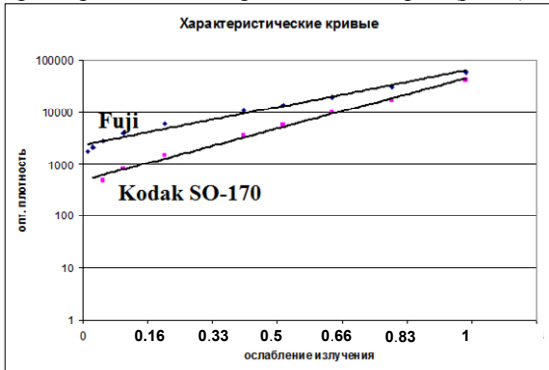


Рис. 2. Характеристические кривые для Fuji и Kodak SO-170

Пластину Fuji имеют меньший коэффициент контрастности и больший динамический диапазон, чем Kodak SO-170. Для целей толщинометрии нам важен именно динамический диапазон. Вследствие этого появляется возможность исследовать и контролировать детали более сложной формы с большей толщиной, чем это возможно на пленке.

Система сканер "HD-CR 35 NDT"-фосфорная пластина позволял получать изображения высокого качества с разрешением до 40 пар линий/мм.

Для измерения толщины стенки трубы был выбран образец трубы диаметром 57,5 мм и толщиной стенки 4,6 мм. На образец был закреплен при помощи пластины шарик диаметром 11,1 мм. В качестве детектора были использованы пластины Kodak SO-170, Fuji, Dürr-NDT со свинцовыми экранами. Изображение с наилучшей точностью было получено на пластине Fuji, которая обладает наибольшим динамическим диапазоном и наименьшей чувствительностью к излучению. Просвечивание данной пластины проводилось при следующих заданных параметрах рентгеновского аппарата: U=180кВ, Ia=3мА, время экспозиции составило t=30с, фокусное расстояние 600 мм, при размерах фокусного пятна 4×4 мм.

После экспонирования пластины на снимке получили увеличенное изображение профиля стенки трубопровода S (рис.3).

Для измерения данные были экспортированы в программу Excel и построен график изменения оптической плотности от расстояния. Для уменьшения шумов было проведено усреднение по 10 точкам и медианная фильтрация, это позволило улучшить отношение сигнал-шум в 5

раз. Затем график был разбит на области и аппроксимирован для получения точных данных о координатах точек внешней и внутренней поверхности (рис. 4).

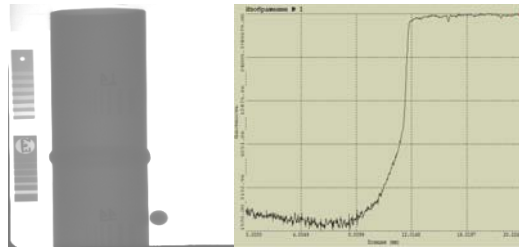


Рис. 3. Радиографический снимок объекта исследования и интерпретация сечения трубы в ВидеоРен

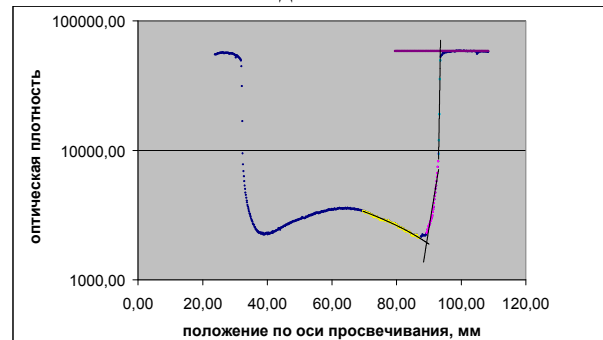


Рис. 4. Экспериментальная функция зависимости оптической плотности снимка трубы от положения по оси в направлении просвечивания

Для исключения факторов, влияющих на точность измерения толщины стенки при радиографическом методе толщинометрии, и для упрощения определения толщины стенки трубы при просвечивании применялся образец для сравнения геометрии.

Реальная толщина стенки трубы определяется из выражения:

$$S = \frac{d_0}{d'_0} \cdot S'$$

, где d_0 – диаметр шарика для сравнения, мм; d'_0 - увеличенный диаметр шарика, измеренный на детекторе, мм; S' - увеличенный диаметр трубы, измеренный на детекторе, мм.

Абсолютная погрешность измерения по снимку превысила 0.5 мм. Таким образом, мы получили погрешность, которая не удовлетворяет цели эксперимента. Однако наиболее точные результаты были получены в случае использования фосфорной пластины Fuji и при тщательном подборе экспозиции.

Повышение точности измерений толщины стенки трубы требует учета влияния частотно-контрастных характеристик системы фосфорная пластина-сканер исследование и учет шумовых характеристик детектора.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СВЕРХМИНИАТЮРНЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ВИРТУАЛИЗИРОВАННЫХ ПРИБОРАХ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Дмитриев С.Ф.*, Ишков А.В., Лященко Д.Н.

*ГОУ ВПО «Алтайский государственный университет», ФГОУ ВПО «Алтайский государственный аграрный университет», Барнаул, Россия

E-mail: olg168@rambler.ru

Введение

Концепция виртуализированных измерительных приборов (ВИП) - современных измерительных программно-аппаратных (ПА) комплексов базируется на максимальной виртуализации функций измерительного устройства, не связанных с непосредственным получением информации от контролируемого объекта и среды [1]. Ее практическое воплощение стало возможным с появлением современных высокопроизводительных ЭВМ, позволяющих основной алгоритм работы прибора, в части первичной обработки сигнала, его преобразовании, сравнении со стандартом, накоплении результатов последовательных измерений и их статистическую обработку, вывод полученных результатов и управление функциями измерителя, реализовать в виде специальной компьютерной программы, написанной на языке высокого уровня [2].

У ВИП всегда открытой остается задача получения цифрового сигнала от первичного датчика для его последующей обработки специализированной компьютерной программой - виртуальным прибором, однако для многих прикладных задач оказываются достаточными возможности встроенных практически в любую ЭВМ АЦП/ЦАП - звуковых карт.

Необходимыми и достаточными условиями такого применения звуковых карт являются низкие мощности, развиваемые в цепи первичного измерительного преобразователя - датчика, и ограниченный звуковым, диапазон используемых частот.

Соблюдение этих условий позволяет реализовывать большую гамму измерительных устройств, находящихся применение для неразрушающего контроля различных параметров объектов и окружающей среды [3].

В задачах неразрушающего контроля особое место отводится методу вихревых токов (МВТ). МВТ базируется на возбуждении в контролируемом объекте или среде под воздействием переменного магнитного поля, создаваемого вихретоковым преобразователем (ВТП), вихревых токов и одновременной регистрации ВТП вторичного поля. Величина вторичного поля сложным образом зависит от параметров контролируемого объекта и если должным образом выстроить математическую модель отклика преобразователя на поле вихревых

токов, то становится возможным определять отдельно более десятка параметров исследуемого объекта [3, 4].

Задача отклика первичного преобразователя в МВТ является не только математической, сводящейся к отысканию решения соответствующего уравнения для векторного потенциала в случае определенного значения обобщенного параметра, учитывающего свойства объекта, но и физической и инженерной - связанной с установлением оптимальных условий измерений и конструкции самого датчика, а при создании ВП к ней добавляется еще и задача обеспечения специализированного программного обеспечения (ПО) ВП с произвольной звуковой картой ПК.

Расчет параметров вихретокового преобразователя

Ранее нами была подведена теоретическая основа для расчета напряжения в измерительной обмотке ВТП, вносимого вихревыми токами, возникающими в неферромагнитном проводящем полупространстве при нависании над ним возбуждающей обмотки ВТП с известными характеристиками [5].

Напомним, что такой расчет связан с решением уравнения Максвелла, с граничными условиями, зависящими как от структуры рассматриваемых моделей среды, так и от конструкции датчика.

Так, при нависании витка с током над проводящей средой в плоскости, параллельной границе раздела, уравнения Максвелла принимают вид:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J}_{\text{ст}}; \quad \operatorname{rot} \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t, \quad (1)$$

где \vec{H} и \vec{E} - векторы напряженности соответственно магнитного и электрического полей; \vec{B} - вектор магнитной индукции; $\vec{J}_{\text{ст}}$ - вектор плотности полного тока.

Уравнения Максвелла можно свести к уравнению Гельмгольца для векторного потенциала \vec{A} [6], определяемого выражением $\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A}$, которое, если ток в витке изменяется по гармоническому закону с круговой частотой ω , приводится к неоднородному уравнению Гельмгольца.

$$\nabla^2 \vec{A} + k^2 \vec{A} = -\mu_a \vec{J}_{\text{стоп}}, \quad (2)$$

где $k^2 = -j\omega\mu_a\sigma$; $j = \sqrt{-1}$; σ - удельная электропроводимость; μ - магнитная проницаемость; μ_0 - магнитная постоянная.

Уравнение (2) в цилиндрической системе координат имеет вид:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial A}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \left(\frac{1}{\rho} - k^2 \right) A = -\mu\mu_0 J_{ct} \quad (3)$$

Уравнение (3) решается, например, методом интегрального преобразования Фурье-Бесселя с ядром в виде функции Бесселя первого рода первого порядка [7].

Нами были проведены расчёты напряжений, вносимых в измерительную обмотку ВТП, для малых R_1, R_2, h, x , несущественности магнитных потерь и определяющем влиянии гистерезисных потерь с $tg\delta$ в магнитопроводе датчика.

Расчёты проводились при следующих параметрах датчика: $\mu_{max}=5 \times 10^2$ Гн/м, $\sigma=22,5 \times 10^6$ См/м, $f=3 \times 10^3$ Гц, сила тока в обмотке датчика $J_{mo}=30$ мА, число витков измерительной обмотки $W_1=20$, число витков токовой обмотки $W_2=400$, средний радиус измерительной обмотки $R_1=0,5 \cdot 10^{-4}$ м, средний радиус токовой обмотки $R_2=1,3 \cdot 10^{-4}$ м, расстояние от датчика до поверхности $h_1=0 \div 0,2 \times 10^{-3}$ м, расстояние от эквивалентного витка, заменяющего возбуждающую обмотку трансформаторного датчика отраженного поля, до объекта $h_2=0 \div 0,2 \times 10^{-3}$ м, их результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1
Результаты расчетов напряжения, вносимого в измерительную обмотку ВТП

$h_1, \text{ м}$	0,0001	0,0002	0,0002	0,0001
$h_2, \text{ м}$	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001
β_0	0,2993	0,4088	0,4088	0,2993
$\xi = \frac{h_1 + h_2}{D_3}$	0,73	0,71	0,54	0,48
$10^4 \text{ Re}_{oi}(\lambda) \times$	100	160	160	100
$10^4 \text{ Im}_{oi}(\lambda) \times$	2	6	2	2
$U_0, \text{ В}$	0,536	11,08	6,57	11,08
$\times 10^2 \text{ Re}(U_{en})$	1,25	2,12	0,353	2,68
$10^4 \text{ Im}(U_{en}) \times$	2,5	0,794	1,35	2,68

Анализ проведенных расчетов и зависимостей импеданса от действительной части вносимого напряжения в измерительную обмотку ВТП для случая неферромагнитного материала показали, что с заданными параметрами датчика можно уверенно фиксировать измерительные сигналы, используя маломощные тракты звуковых адаптеров большинства современных ПК.

Соответствующий годограф для низких значений обобщенного параметра нелинейно зависит от параметров нависания ВТП над объектом и может быть использован (после аппроксимации) в качестве приборной функции в ВИП, использующих указанные датчики.

Особенности аппаратной реализации

Для реализации аппаратной части ВИП МВТ нами было разработано два типа первичных ВТП, с характеристиками, позволяющими непосредственно подключать их к аналоговому входу/выходу звукового адаптера ПК: первый тип датчика выполнен по схеме дифференциального ВТП с тремя катушками, одна из которых является калибровочной, а другие – возбуждающей и измерительной (рис. 1); второй тип датчика, представляет собой дифференциальный вихретоковый преобразователь, работающий в режиме самосравнения или сравнения с внутренним эталоном (рис. 2).

Учитывая особенности конструкции и малый размер разработанных датчиков, они могут быть отнесены к сверхминиатюрным вихретоковым преобразователям (СМВТП) накладного типа.

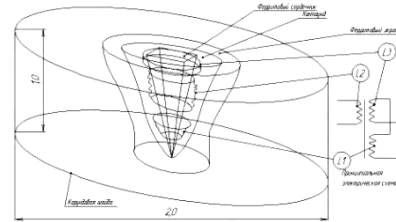


Рис. 1. Схема конструкции СМВТП для прямых измерений

Первый тип конструкции СМВТП позволяет проводить прямые измерения различных характеристик материалов, связанных с напряжением, вносимым в измерительную обмотку ВТП, с относительной погрешностью до 5 %, требует использования дополнительной защиты от возможных наводок посторонними переменными магнитными полями, но в нем может быть осуществлен режим абсолютной калибровки. Он может с успехом применяться для вихретоковой толщинометрии в составе разработанного нами прибора ВВТ-2М.

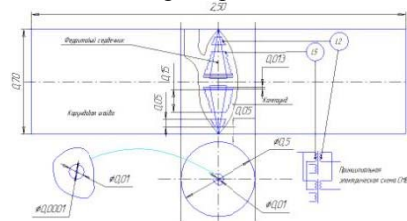


Рис. 2. Эскизный чертеж СМВТП для измерений в режиме самосравнения

Вторая конструкция СМВТП обеспечивает его работу в режиме самосравнения, однако конструктивно датчик изготовлен по принципу

сравнения со стандартным образцом, т.е. рабочий и образцовый ВТП не связаны индуктивно и имеют независимые измерительные и возбуждающие обмотки. Такая конструкция СМВТП обеспечивает измерение характеристик материалов с относительной погрешностью уже до 0,1-0,5 %, защищает рабочий ВТП от внешних наводок и позволяет использовать его для комплектования измерителя электропроводности неферромагнитных материалов ИЭНМ-20М.

Дифференциальное включение катушек и фокусировка возбуждающего поля сердечником позволяет датчикам обоих типов проводить высокочувствительные локальные исследования проводящих материалов на площади 50 – 80 мкм².

В качестве материала сердечников СМВТП использовался среднечастотный малодиссипативный феррит, выбранный из ферритов марки 2000 НМ3 по величине максимальной начальной магнитной проницаемости. Была разработана и технология изготовления сигнальных и генераторных катушек с использованием оригинальной оснастки для микроминиатюрных намоточных работ. Катушки СМВТП пропитаны эпоксидным компаундом и обеспечивают устойчивую работу датчиков при температурах до 200 °С, а сами датчики с системой их распайки помещаются в пластмассовый корпус держателя.

Для реализации виртуализированного измерительного прибора МВТ выбранный тип СМВТП подключается непосредственно к разъемам звукового адаптера ПК, а запуск специализированного ПО обеспечивает конфигурирование и работу соответствующего ПА-комплекса.

Таким образом, любой измерительный ПА-комплекс ВИП МВТ условно состоит из трех основных частей: вихрекового преобразователя (СМВТП); звуковой карты (используемой как АЦП/ЦАП) и специализированного ПО, объединенного с другими устройствами и программами в архитектуре персонального компьютера.

Дальнейшую работу аппаратной части ВИП рассмотрим на примере измерения электропроводности прибором ИЭНМ-20М.

В случае взаимодействия СМВТП с объектом происходит изменение уровня и характеристик входного сигнала АЦП, как по отношению к нулевому сигналу, так и по отношению к сигналу на выходе ЦАП. Для расчета величины измеряемого параметра, например, электрической проводимости, необходимо установить соответствие между уровнем сигнала на приемной катушке и измеряемым параметром.

Одним из вариантов установления этого соответствия служит аппаратная кривая, для построения которой нами был использован набор контрольных образцов имеющих заранее

известную электропроводность. Удельная электрическая проводимость использованных образцов была определена при помощи двойного моста Уитстона при температуре 20±5°С с погрешностью не более 1%.

Однако, при конструировании программно-аппаратных комплексов, существенной проблемой является совместимость ПО и нестандартизированных АЦП/ЦАП, которая связана с несовпадением характеристик аналоговых усилительных и преобразующих сигнал компонент.

Так, например, на рис. 3 представлена зависимость уровня напряжения на генераторной катушке СМВТП от условных единиц виртуального генератора для трех различных звуковых карт.

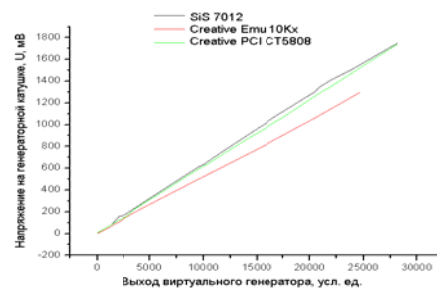


Рис. 3. Напряжение на генераторной катушке СМВТП в зависимости от сигнала генератора

Аналогичные различия обнаруживаются и для зависимости между условными единицами сигнала на выходе АЦП и уровнем напряжения на приемной катушке.

Для решения этой проблемы совместимости может быть использована некая эталонная, стандартная звуковая карта и зависимость между уровнем напряжения на приемной катушке и условными единицами сигнала на выходе ее АЦП, для которой определяется соответствующий коэффициент наклона k - чувствительность. Затем проводится аппроксимация зависимости измеряемого параметра подходящей функцией, например, электропроводность неферромагнитных образцов от сигнала АЦП эталонной карты, которая в МВТ может аппроксимироваться полиномом третьей степени [8]:

$$\sigma = a(y - y_0)^3 + b(y - y_0)^2 + c(y - y_0) + d, \quad (4)$$

где σ - значение электропроводности объекта контроля, МСм/м; y - условные единицы сигнала на выходе АЦП звуковой карты; y_0 - условные единицы шумового сигнала на выходе АЦП звуковой карты; a , b , c и d - коэффициенты аппроксимации.

Тогда для остальных звуковых карт устанавливается соответствие между уровнем

напряжения на приемной катушке СВВП и условными единицами сигнала на выходе АЦП, которые затем приводятся к показаниям эталона по формуле: $y_1 = (k_1/k_2)y_2$, где y_1 – приведенное значение условных единиц эталонной карты; y_2 – количество условных единиц текущей карты; k_1 – коэффициент наклона для эталонной карты; k_2 – коэффициент наклона для текущей карты.

После чего, значение электрической проводимости, измеренное по уровню сигнала с любой произвольной звуковой карты, можно рассчитывать по формуле (5):

$$\sigma = (a(y-y_0)^3 + b(y-y_0)^2 + c(y-y_0) + d) \times \frac{k_1}{k_2} \quad (5).$$

В ходе предварительной калибровки прибора определяется вид функциональной зависимости между контролируемым параметром объекта и сигналом на входе эталонной АЦП, набор коэффициентов чувствительности для различных звуковых карт и эталонной АЦП/ЦАП, а также соответствующая аппаратная кривая, параметры которых заносятся в ПО, в блок обработки и управления.

Общие подходы к реализации программной части

Схемы измерительных программно-аппаратных комплексов, подобных ВИП, уже сейчас реализуются, например, в среде разработки специализированного ПО LabView, либо приемами отдельной программной обработки data-файлов, содержащих измерительную информацию или параметры различных объектов стандартными средствами Windows [9]. Однако, необходимость постоянного обращения к оболочке среды разработки или ее библиотекам либо «ручного» копирования и обработки файлов с данными (при втором подходе) снижают скорость измерений, увеличивают систематическую и случайную погрешность измерений и сильно ограничивают возможности обработки измерительных сигналов встроенным в такие среды ПО. Кроме того, это лишь макеты (виртуальные приборы!), не способные самостоятельно запускаться на ПК при отсутствии на них предварительно установленной среды разработки, что существенно ограничивает их области применения, увеличивает стоимость и ставит в зависимость от лицензируемого программного обеспечения (ПО), их разработчиков.

Первый общий подход к разработке специализированного ПО для ВИП, заключается в использовании интерфейса низкого уровня. Низкий уровень позволяет приложениям получать доступ к буферам, содержащим воспроизводимые или записываемые звуковые данные, работать с внутренней структурой файлов, содержащих звуковую информацию, а также использовать другие дополнительные возможности [10].

Для работы со звуковым адаптером в ОС Windows нет необходимости программировать на уровне портов ввода/вывода, прерываний и каналов прямого доступа. Весь необходимый интерфейс (высокого или низкого уровня) предоставляется приложению DLL-библиотекой mmsystem.dll [10, 11].

Для разработки специализированного ПО нами также используются два стандартных драйвера звукового устройства: драйвер для ввода звука (Waveform Input Driver) и драйвер для вывода звука (Waveform Output Driver). Эти драйверы поставляются вместе со звуковым адаптером, устанавливаются после установки ОС и позволяют Windows обмениваться со звуковыми устройствами wav-файлами, а при установке Codec-ов и файлами других форматов. Таким образом, любое создаваемое под Windows ПО автоматически будет иметь полный контроль над процессом воспроизведения/записи, так как оно само должно подготовить блоки данных в оперативной памяти.

Второй общий подход к разработке специализированного ПО для ВИП, заключается в использовании микшерной подсистемы Windows для получения приложением возможности жесткого контроля параметров звукового устройства [10].

Стандартное микшерное приложение ОС Windows - SndVol32 предоставляет собой унифицированный интерфейс пользователя с любым возможным микшерным устройством, при добавлении в систему нового устройства, имеющего драйвер микшера, оно также может управляться с помощью этого стандартного приложения.

Все необходимые константы, типы, структуры и прототипы функций микшерной подсистемы Windows определяются в файле mmsystem.h, который по умолчанию включается в компиляцию из общего файла windows.h, дополнительные константы определены в файле mmreg.h, а интерфейсные функции импортируются из библиотеки winmm.lib [10, 11].

С использованием описанных выше подходов управления звуковым адаптером, его настройками и связи со стандартными библиотеками ОС Windows, нами был разработан универсальный wave-модуль ПО для ВИП, использующих встроенный звуковой адаптер ПК как АЦП/ЦАП (рис. 4).

Программное обеспечение для работы с wave-данными было разработано на языке высокого уровня C++ и протестировано на ОС MS Windows 95/98/2000/XP/Vista, имеет интерактивный оконный интерфейс, обеспечивает оцифровку измерительных сигналов звуковой частоты в режиме реального времени с последующей их передачей специализированному ПО ВИП.



Рис. 4. Функциональная схема wave-блока универсального ПО для ВИП МВТ

Разработанный универсальный wave-модуль ПО можно условно разделить на четыре функциональных элемента: - управление микшерной подсистемой Windows (Mixer.cpp), - управление стандартным звуковым устройством Windows (Wave.cpp), - функции для работы с файлами (dbBase.cpp), - функции обработки сообщений элементов управления (Unit1.cpp).

Функции каждого из модулей ПО при работе могут, кроме того, вызывать встроенные функции среды разработки Borland C++ Builder v. 6.0, а также API-функции [11].

Третий подход к реализации ПО ВИП основывается на модульном принципе его организации как ИП прямого действия, при последовательной обработке звуковых wave-данных в режиме реального времени. Тогда ВИП будет содержать следующие модули: - запуска программы; - запуска wave-блока; - инициализации и калибровки устройства; - запуска основного (измерительно-преобразовательного) цикла программы; и - блок завершения программы.

Рассмотрим алгоритмическую реализацию этих подходов на примере одного из разработанных нами ВИП, использующих для измерений МВТ - измерителя электропроводности неферромагнитных материалов ИЭНМ-20М.

При запуске специализированного ПО этого прибора сначала происходит его инициализация, а затем калибровка устройства, которая заключается в замере уровня нуля на сигнальной катушке первичного преобразователя, одинакового для обоих приборов – вихретокового преобразователя (СМВТП).

После того как инициализация и калибровка будут удачно завершены, начинается основной цикл работы программы в функции DataWaveIn() - рис. 5.

В ходе выполнения основного рабочего цикла работы программы происходит постоянное считывание уровня сигнала с выхода АЦП микрофонного входа звуковой карты.

На основе получаемых данных осуществляется разделение металлов на ферромагнитные и неферромагнитные и производится расчет электропроводности неферромагнитных материалов при $\sigma > 3$.

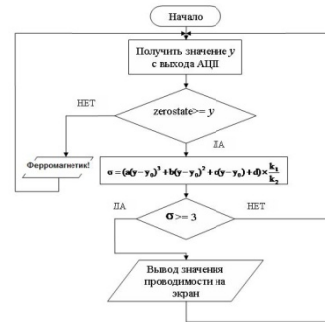


Рис. 5. Алгоритм основного цикла ВИП МВТ ИЭНМ-20М

Тестирование разработанного программно-аппаратного комплекса ИЭНМ-20М с описанными особенностями реализации его аппаратной части показало, что абсолютное значение среднего взвешенного для основной погрешности измерения электропроводности, полученное в серии 5 опытов, не превысило 0,8 МСм/м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев С.Ф., Ишков А.В., Лященко Д.Н., Новоженев А.В. // Научные исследования: информация, анализ, прогноз: монография. – Кн. 28. – Воронеж: ВГПУ, 2010. С. 580-592.
2. Ишков А.В., Дмитриев С.Ф. Современная концепция сопряжения измерительных приборов с ЭВМ. // Измерение, контроль, информатизация: Материалы восьмой междунар. научн.-техн. конф. -Барнаул: АлтГТУ, 2007. С. 3-6.
3. Дмитриев С.Ф., Панов С.Г., Ишков А.В. // Ползуновский альманах. № 2. 2008. С. 15-20.
4. Герасимов В.Г., Ключев В.В., Шатерников В.Е. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий. - М.: Изд-во Энергоатомиздат, 1983.
5. Сагалаков А.М., Дмитриев С.Ф., Тарусин Д.Ю., Ишков А.В. // Вестник ТГУ. - Бюлл. опер. научн. инф. № 64, март, 2006. С. 25-29.
6. Гинзбург В.Л. Электродинамика - М.: Наука. 2004.
7. Vernon S.N. // Mater. Eval. 1988. V.46. №12. P.1581-1587.
8. Неразрушающий контроль материалов и изделий. / Под ред. Г.С. Самойловича. – М.: Машиностроение, 1976.
9. Жарков Ф.П., Каратаев В.В., Никофоров В.Ф., и др. Использование виртуальных инструментов LabView. -М.: Радио и связь, 1999.
10. Гордеев О. Программирование звука в Windows. -М.: BHV, 2007.
11. Страуструп Б. Язык программирования C++. -СПб.: Невский Диалект, 1999.

МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО СПЛАВА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОМ ОБЛУЧЕНИИ В АЗОТСОДЕРЖАЩЕЙ ПЛАЗМЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

Овчаренко В.Е., Иванов Ю.Ф., Моховиков А.А.

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: ove45@mail.ru

Введение

В [1-10] показано, что в результате импульсного электронно-пучкового облучения в поверхностном слое металлокерамического сплава формируется неравновесное структурно-фазовое состояние в виде высокодисперсной структуры металлокерамического сплава с металлическим связующим в наноструктурированном состоянии. В результате снижается коэффициент трения на поверхности металлокерамического сплава, повышается нанотвердость его поверхности и стойкость металлокерамического сплава в условиях резания металла. В то же время исследования температурных зависимостей коэффициента трения на поверхности облученного с различными энергетическими параметрами металлокерамического сплава показали увеличение величины коэффициента трения с повышением температуры практически до его значения для металлокерамического сплава в исходном (до облучения) состоянии при температуре 600 °С [11]. Последнее означает снижение физических свойств поверхностного слоя металлокерамического сплава и его стойкости в условиях резания металла.

Другими словами, задача состоит в повышении термической стабильности неравновесного структурно-фазового состояния, в сохранении при повышенных температурах уникальных физических свойств наноструктурированного поверхностного слоя.

Стабилизация наноструктурированного состояния поверхностного слоя при повышенных температурах возможна путем дополнительного образования на внутрифазных границах раздела его наноструктурированного структурно-фазового состояния наноразмерных частиц тугоплавких нитридов. Например, в условиях взаимодействия поверхности металлокерамического сплава во время ее электронно-пучкового облучения с нитридообразующим газом в атомарном состоянии. Последнее возможно при импульсном электронно-пучковом облучении металлокерамического сплава в азотсодержащей плазме газового разряда.

Целью настоящей работы является оценка эффективности взаимодействия атомарного азота с поверхностью и его накопления в поверхностном слое при импульсном электронно-пучковом облучении металлокерамического сплава, влияния электронно-пучкового облучения

на микроструктуру и физические свойства поверхностного слоя и стойкость металлокерамического сплава в условиях резания металла.

Материал и методика исследования

Образцы для исследований были изготовлены из металлокерамического сплава TiC-50(Ni-Cr-Al) в виде четырехгранных пластинок размером 10×10×4 мм. Подготовленные до уровня металлографических шлифов плоские поверхности образцов облучали электронным пучком с заданными значениями длительности импульса воздействия, плотности энергии электронов в импульсе и частоты следования импульсов облучения. Давление атомарного азота в рабочей камере установки составляло 2×10^{-2} Па. Микроструктуру поверхности образцов после электронно-пучковой обработки и поверхности разрушения металлокерамического сплава исследовали на сканирующем электронном микроскопе SEM-515 «Philips». Элементный анализ участков поверхности металлокерамического сплава до и после электронно-пучкового облучения проводили с помощью приставки EDAX ECON IV к электронному сканирующему микроскопу SEM-515 «Philips». Фазовый состав и дефектную субструктуру металлокерамики анализировали на дифракционном электронном микроскопе ЭМ-125. Микротвердость поверхности облучения определяли на твердомере ПМТ-3. Исследование влияния электронно-пучкового облучения в азотсодержащей атмосфере на стойкость металлокерамического сплава были проведены на образцах в виде режущих пластин в условиях резания металла на токарном станке, оснащенном оборудованием для измерения износа на передней и задней поверхностях режущей пластины в режиме реального времени. Измерения износа режущей пластины из металлокерамического сплава при резании стальной заготовки проводили при следующих параметрах резания: скорость резания $V = 80$ м/мин, глубина резания $t = 1$ мм, подача $s = 0,1$ мм/об.

Результаты исследования и их обсуждение

В работах [12,13] путем численных расчетов было показано, что за время одиночного импульса в поверхностном слое металлокерамического сплава возможно образование диффузионной зоны с концентрацией азота в ней 1,5-2,0 ат.%. С увеличением плотности энергии в электронном пучке и давления азота в камере содержание азота

в поверхностном слое металлокерамического сплава за время одиночного импульса облучения увеличивается и тем в большей степени, чем больше плотность энергии в электронном пучке и чем больше давление азота в камере. Продемонстрирована возможность азотирования металлического связующего поверхностного слоя металлокерамического сплава TiC-50 об.%(Ni-Cr-Al) на глубину до 5 мкм при содержании азота в поверхностном слое до 1,5 – 2,0 ат.%

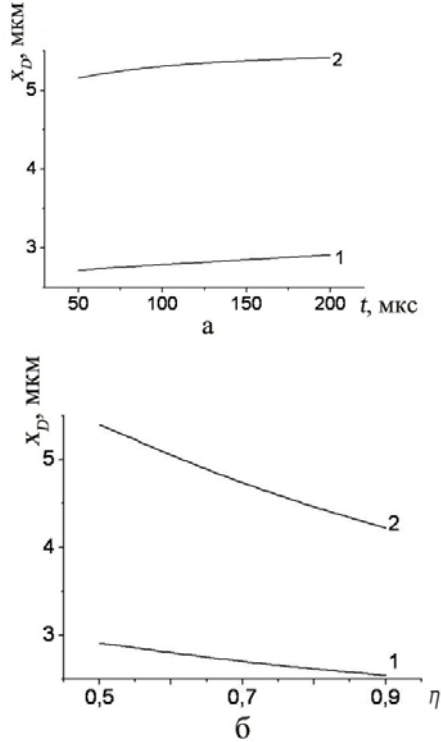


Рис. 1. Расчетные зависимости величины диффузионной зоны азота с поверхности облучения металлокерамического сплава от длительности одиночных импульсов облучения при плотностях энергии в электронном пучке 20 (кривые 1) и 40 (кривые 2) Дж/см² при содержании карбидной компоненты в металлокерамическом сплаве 50 об. % (а) и от содержания карбидной компоненты в металлокерамической композиции (б)

Согласно проведенным оценкам, образцы металлокерамического сплава облучали электронным пучком импульсами длительностью 50...200 мкс при плотности энергии в электронном пучке 20...60 Дж/см² при давлении остаточной атмосферы (аргон или азота) в камере $\sim 10^{-2}$ Па. Толщина расплава металлического связующего в поверхностном слое металлокерамики при этом достигала 10 мкм. Скорость охлаждения расплава по окончании импульса облучения составляла 10^6 К/с.

На рис. 2 а,б представлены зависимости микротвердости поверхности металлокерамического сплава от плотности

энергии в электронном пучке при длительности импульсов облучения 150 мкс (а) и 200 мкс (б) и 15 импульсах облучения в аргонсодержащей (кривые 1) и азотсодержащей (кривые 2) атмосферах.

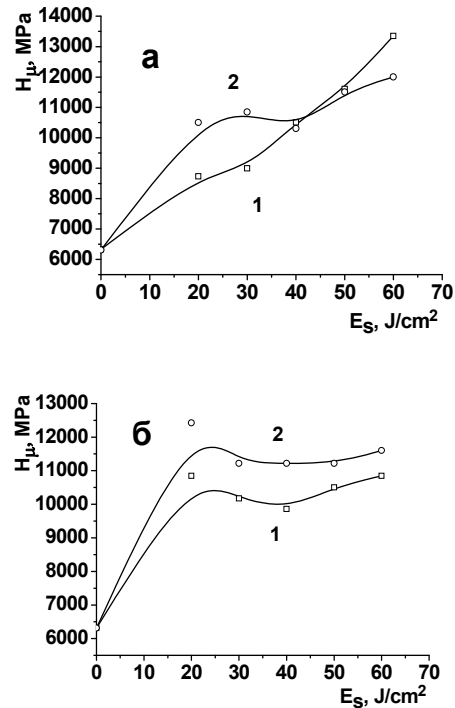


Рис. 2. Зависимости микротвердости поверхности образцов металлокерамического сплава после электронно-пучкового облучения импульсами длительностью 150 мкс (а) и 200 мкс (б) в аргонсодержащей (кривые 1) и азотсодержащей (кривые 2) атмосферах от плотности энергии в электронном пучке

Анализируя представленные на данном рисунке зависимости можно отметить, что при длительности импульсов пучка электронов 150 мкс облучение при малых и средних значениях плотности энергии пучка электронов (20...30 Дж/см²) в азотсодержащей среде приводит к более значительному упрочнению поверхностного слоя, по сравнению с облучением в среде аргона (рис. 2, а); при длительности импульсов пучка электронов 200 мкс интервал облучения, при котором наблюдается значительное упрочнение поверхностного слоя (рис. 2, б), существенно расширяется (20...60 Дж/см²). При малых значениях плотности энергии пучка электронов это различие достигает величины в 1500 МПа и постепенно снижается с ростом плотности энергии в электронном пучке.

Очевидно, что наиболее вероятными причинами выявленного увеличения твердости поверхностного слоя металлокерамики являются насыщение поверхностного слоя азотом (формирование твердого раствора азота в связующем сплаве) и образование частиц

нитридной фазы. Анализ фазового состава поверхности облучения осуществляли методами электронной дифракционной микроскопии тонких фольг. На рис. 3 приведена микроструктура поверхностного слоя металлокерамического сплава после электронно-пучкового облучения в азотсодержащей атмосфере. Для сравнения на рис. 4 приведена микроструктура металлокерамического сплава после азотирования при температуре 800 °С в течение 1 часа в плазме газового разряда. Отчетливо видно, что в обоих случаях насыщение металлокерамики азотом сопровождается формированием в поверхностном слое образцов частиц второй фазы.

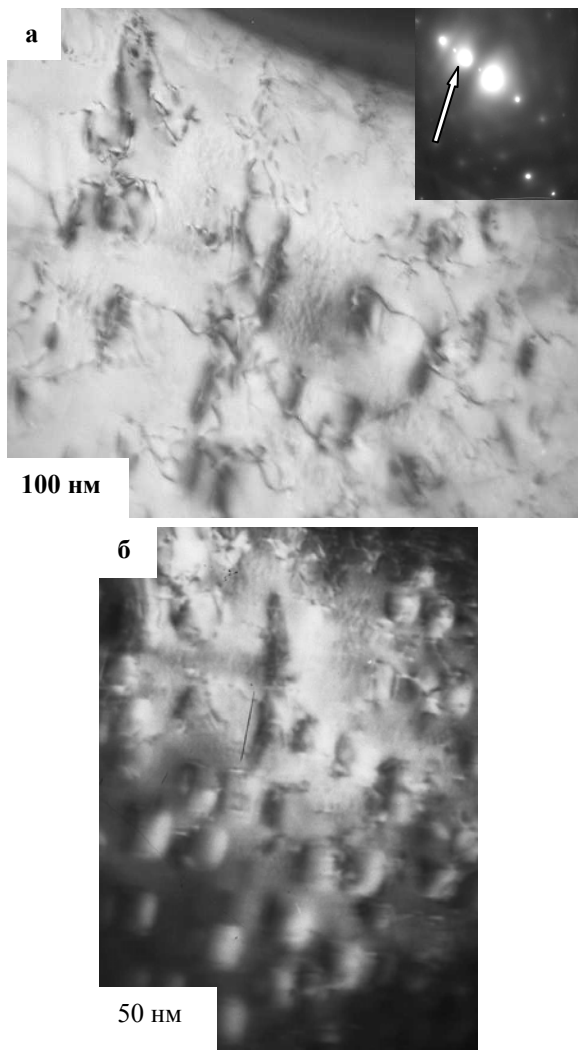


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя металлокерамики после электронно-пучкового облучения в азотсодержащей атмосфере; а – светлое поле; б – темное поле, полученное в совпадающих рефлексах $[002]Ni + [102]AlN$; в – микроэлектроннограмма (стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле)

Анализ микроэлектроннограмм, полученных с данных фольг, дает основание говорить, что в

связующем материале (Ni-Cr-Al) металлокерамики формируются выделения нитридной фазы. Электронно-пучковое облучение в азотсодержащей атмосфере приводит к образованию частиц нитрида титана и нитрида алюминия (рис. 3). Частицы нитрида титана имеют преимущественно округлую форму; размеры их изменяются в пределах 50...100 нм. Частицы нитрида алюминия имеют пластинчатую форму; размеры их изменяются в пределах 30...80 нм.

Азотирование в плазме газового разряда сопровождается образованием частиц состава AlN и $Ti_3Al_2N_2$ (рис. 4). Частицы $Ti_3Al_2N_2$ являются кубоидами, размеры их изменяются в пределах 50...100 нм.

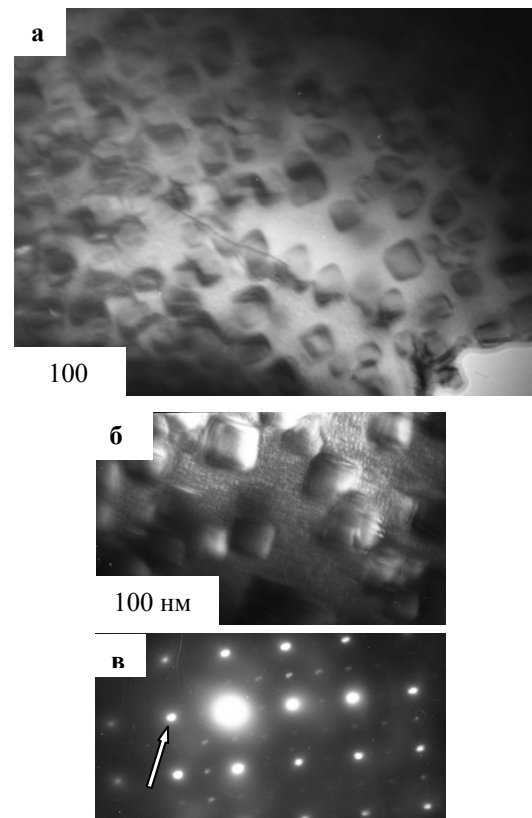


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя металлокерамики, подвергнутой азотированию в плазме газового разряда; а – светлое поле; б – темное поле, полученное в совпадающих рефлексах $[002]Ni + [109]Ti_3Al_2N_2$; в – микроэлектроннограмма (стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле)

Исследование стойкости металлокерамического сплава в условиях резания металла в зависимости от режимов импульсного электронно-пучкового облучения в азотсодержащей атмосфере показало неоднозначность влияния взаимодействия азота с облучаемой поверхностью на стойкость металлокерамического сплава. На рис. 5

приведены зависимости времени резания стали резцом из металлокерамического сплава до заданной степени износа его режущей кромки от длительности импульса электронно-пучкового облучения при различных значениях плотности энергии в электронном пучке в аргон- и азотсодержащей плазме газового разряда.

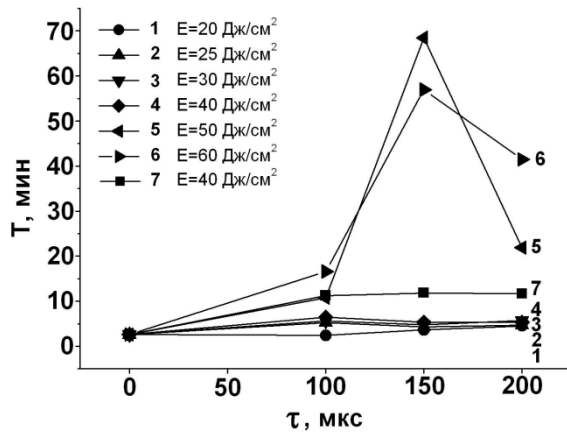


Рис. 5. Зависимости времени резания стали резцом из металлокерамического сплава до заданной степени износа его режущей кромки от длительности импульсов электронно-пучкового облучения в азотсодержащей плазме газового разряда при различной плотности энергии в электронном пучке: 1 – 20 Дж/см², 2 – 25 Дж/см², 3 – 30 Дж/см², 4 – 40 Дж/см², 5 – 50 Дж/см², 6 – 60 Дж/см², 7 – облучение в аргонсодержащей плазме газового разряда, 40 Дж/см²

Из рис. 5 следует, что при облучении металлокерамического сплава электронным пучком с плотностью энергии 20...40 Дж/см² в азотсодержащей плазме газового разряда стойкость металлокерамического сплава при резании металла слабо зависит от длительности импульсов облучения и всегда ниже по сравнению со стойкостью металлокерамического сплава после облучения в аргонсодержащей плазме газового разряда при плотности энергии в электронном пучке 40 Дж/см². Но при увеличении плотности энергии в электронном пучке до 50...60 Дж/см² и длительности импульсов облучения 150 мкс происходит резкое повышение стойкости металлокерамического сплава, обусловленное, по-видимому, повышением термической стабильности наноструктурированного при электронно-пучковом облучении поверхностного слоя металлокерамического сплава в результате образования на межфазных границах его внутренней структуры наночастиц нитридов титана и алюминия. Характерно, что указанное повышение стойкости металлокерамического сплава при резании металла после электронно-пучкового облучения в азотсодержащей плазме газового разряда происходит при увеличении

плотности энергии в электронном пучке до 50 и 60 Дж/см². Последнее означает, что увеличение плотности энергии до указанных значений повышает температуру расплава на поверхности металлокерамического сплава до такой степени, что обеспечивает необходимую скорость растворения азота в расплаве и образования в поверхностном слое металлокерамического сплава наночастиц нитридов титана и алюминия.

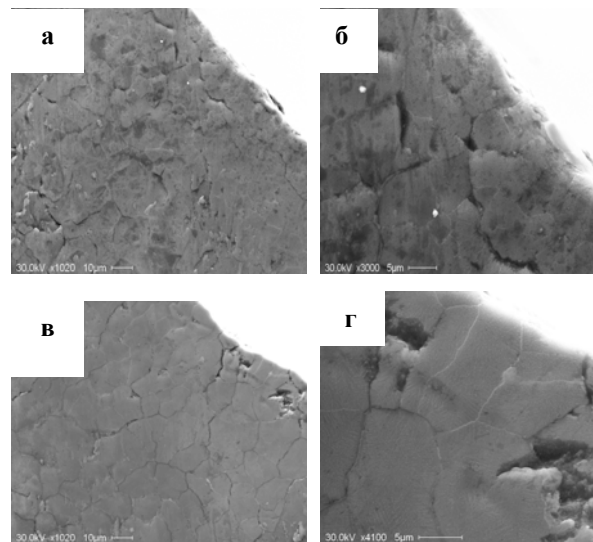


Рис.6. Микроструктуры поверхности режущих кромок образцов металлокерамического сплава, облученных в азотсодержащей плазме газового разряда при плотности энергии в электронном пучке 50 Дж/см² при длительности импульсов облучения 100 мкс (а,б) и 150 мкс (в,г) после испытаний на стойкость металлокерамического сплава при резании металла

На рис.6 приведены микроструктуры поверхности режущих кромок пластин из металлокерамического сплава, облученных в азотсодержащей плазме газового разряда при плотностях энергии в электронном пучке 50 Дж/см² и длительности импульсов облучения 100 и 150 мкс после испытания на стойкость металлокерамического сплава в условиях резания металла. Можно констатировать, что если в первом случае износ режущей кромки определяется, прежде всего, образованием продольных по отношению к режущей кромке микротрещин, образующих магистральные трещины с последующим механическим разрушением режущей кромки по всей длине ее рабочей части (рис. 6 а,б), то во втором случае на поверхности режущей части металлокерамической пластины образуется сеть микротрещин, ориентированных, как правило, перпендикулярно линии режущей кромки и не образующих магистральные трещины (рис. 6 в,г).

Заключение

1. Импульсное электронно-пучковое облучение поверхности металлокерамического сплава TiC-(Ni-Cr-Al) в азотсодержащей плазме газового разряда при заданных значениях плотности энергии в электронном пучке и длительности импульсов облучения приводит к значительному (до 12 раз) повышению стойкости металлокерамического сплава при резании металла (Ст 45).

2. Повышение стойкости металлокерамического сплава TiC-(Ni-Cr-Al) при резании металла, в результате импульсного электронно-пучкового облучения в азотсодержащей плазме газового разряда, обусловлено образованием в поверхностном слое металлокерамического сплава наночастиц нитридов титана и алюминия, стабилизирующих наноструктурное состояние поверхностного слоя металлокерамического сплава при повышенных температурах и предотвращающих преждевременное образование на режущей кромке металлокерамической пластины магистральных трещин и ее механическое разрушение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ovcharenko V.E., Psakhie S.G., Savitskii A.P. Influence of Electronic Radiation on Resistance to Wear of TiC-NiCr Hard Alloy at Cutting Steel. EURO PM 2005 Congress and Exhibition in Prague, Proceedings, 2005, vol.3, p.267–273.

2. V.E. Ovcharenko, Baohai Yu, S.G. Psahie. Electron-beam Treatment of Tungsten-free TiC/NiCr Cermet. I: Influence of Subsurface Layer Microstructure on Resistance to Wear during Cutting of Metals // Journal Materials Science & Technology, vol.21, N3, 2005, p.427–429.

3. Овчаренко В.Е., Псахье С.Г., Лапшин О.В. Электронная обработка безвольфрамовой металлокерамики. II. Структурные превращения в приповерхностном слое // Физика и химия обработки материалов, 2005, №1, стр.31–34.

4. Yu Baohai, Ovcharenko V.E., Psakhie S.G., Lapshin O.V. Electron-beam Treatment of Tungsten-free TiC/NiCr Cermet II: Structural Transformation in the Subsurface Layer // Journal Materials Science & Technology. –2006. – V.22, N4. – P.511–513.

5. Овчаренко В.Е., Иванов Ю.Ф., Юй Баохай Наноструктурное упрочнение инструментального металлокерамического сплава при электронно-пучковом облучении его поверхности // Перспективные материалы, специальный выпуск.- Сентябрь 2007. – С.450–455.

6. Ovcharenko V.E., Ivanov Y.F., Yu Baohai Nanostructural Modification of Surface Layer of Tool Metall-Ceramic Alloy during Electron-beam Irradiation. Proceeding of the 5th International Conference on Physical and Numerical Simulation on Materials Proceccing, October 23–27, 2007, Zhengzhou, China.

7. Овчаренко В.Е., Иванов Ю.Ф. Влияние электронно-импульсного облучения на микроструктуру поверхностного слоя металлокерамического сплава // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2008. – №7(637). – С.48–52.

8. Овчаренко В.Е., Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф., Лапшин О.В. Импульсная электронно-пучковая модификация инструментальной металлокерамики на основе карбида титана. В кн. Наноинженерия поверхности. Формирование неравновесных состояний в поверхностных слоях материалов методами электронно-ионно-плазменных технологий / отв. Ред. Н.З.Ляхов, С.Г.Псахье; Рос. Акад. Наук, Сиб. Отд-ние, Ин-т физики прочности и материаловедения. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – С.102–129.

9. Овчаренко В.Е., Моховиков А.А., Ласуков А.А. Влияние электронно-пучкового облучения на стойкость металлокерамических пластин при резании металла // Обработка металлов. – 2008. – №2 (39). – С.23–24.

10. Овчаренко В.Е., Иванов Ю.Ф. Трибологические свойства наноструктурированной поверхности металлокерамического сплава на основе карбида титана // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т.313. – №2. – С.114–118.

11. Ovcharenko V.E., Ivanov Yu.F., Yu Bao Hai. Effect of nanostructural surface modification of tribological properties of metal-ceramic alloy // Rare Metals, Spec. Issue. – 2009. – V. 28. – P. 678–682.

12. Букрина Н.В., Князева А.Г., Овчаренко В.Е. Модель взаимодействия атомарного азота с поверхностью металлокерамического сплава в процессе импульсной электронно-лучевой обработки // Физика и химия обработки материалов. – 2011. – №1. – С.55–60.

13. Овчаренко В.Е., Букрина Н.В., Иванов Ю.Ф., Моховиков А.А., Ван Джинчен, Ю Баохай. Импульсное электронно-пучковое облучение металлокерамического сплава в азотсодержащей атмосфере // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т.318. – №2. – С.110–115.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ЦИФРОВОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Алхимов Ю.В., Гнусов С.Ф., Капранов Б.И., Клименов В.А.

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: alkhimov@tpu.ru

Одним из наиболее эффективных методов неразрушающего контроля является рентгенография [1]. Метод позволяет получить на рентгеновской пленке теньевую картину внутренней структуры объекта. С использованием набора высокотехнологичного оборудования метод дает возможность получать разностороннюю информацию практически обо всех важнейших параметрах вещества.

В настоящее время все шире применяют беспленочные цифровые технологии радиографии [2-4]. Такие методики позволяют быстро выполнять задачи диагностики и дефектоскопии, повышают производительность и качество операций, сокращают время обработки рентгеновских снимков. Для получения изображения вместо пленки применяется специальная фосфорная пластина многократного использования. Исключается «мокрая» технология обработки пленки и пластины нечувствительны к видимому свету.

Фосфорная пластина представляет собой подобный обычной рентгеновской пленке гибкий детектор излучения, в котором на подложку нанесен слой поликристаллического люминофора BaFBr:Eu^{2+} (размер кристаллов порядка 5 мкм) [5]. Под действием рентгеновского излучения часть ионов Eu^{2+} теряет электрон, переходящий в зону проводимости, и переходит в состояние Eu^{3+} . Свободные электроны могут захватываться ионами Vg и образуются метастабильные центры скрытого изображения. Если облучить экспонированный детектор красным светом, то световые кванты, взаимодействуя с центрами скрытого изображения, переводят электроны снова в зону проводимости. Эти электроны могут снова образовать ионы Eu^{2+} в возбужденном состоянии. Снятие возбуждения сопровождается излучением видимого света в голубой части спектра. Интенсивность света пропорциональна рентгеновской экспозиции материала. Облучение фосфорной пластины светом и регистрация фотостимулированного излучения осуществляется специальными лазерными считывающими устройствами и передается в компьютер для анализа и обработки. Экспонирование и считывание фосфорной пластины можно проводить многократно.

Для считывания изображений с фосфорных пластин мы использовали лазерный считыватель HD-CR 35 фирмы Digt NDT, который позволял изменять режимы считывания и применять пластины разных производителей. В экспериментах использовались фосфорные

пластины Fuji SR и Kodak SO-170. Для получения и обработки изображений использовалась программа «Видеорен».

Для оценки чувствительности метода цифровой рентгенографии проведена съемка стыкового сварного соединения двух пластин толщиной 10 мм из малоуглеродистой стали (рис.1). Для просвечивания использовался рентгеновский аппарат РАП 160-5, режимы просвечивания – фокусное расстояние $F=1$ м, анодное напряжение $U=120$ кВ, ток $I=3.5$ мА, время экспозиции $t=30$ с, фосфорная пластина Kodak.

На рис.1. приведен фрагмент сварного шва (1), проволочных эталонов 12 (2) и 13 (3) из железа по ГОСТ 7512-82 [] и канавочного эталона №2 из титана (4) по ГОСТ 7512-82. На изображении сварного шва выявляются дефекты в виде прожогов (5). На изображении отчетливо видна проволока №6 проволочного эталона 12 (диаметр 0.125 мм), что говорит о том, что относительная чувствительность полученного снимка составляет не хуже 1.3 %.

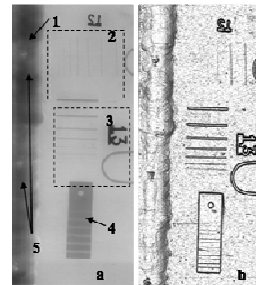


Рис. 1. Стыковое сварное соединение стальных пластин ($d=10$ мм): а – рентгеновское изображение с эталонами, б – исходное изображение обработанное фильтром выделения контуров в программе «Видеорен»

Приведенные данные показывают, что применяемая нами аппаратура и материалы контроля обеспечивают относительную чувствительность по стали порядка 1 – 1.5 %.

На рис.2 показаны рентгенограммы образцов лазерной сварки пластин из титана и нержавеющей стали, полученные методом беспленочной радиографии. Режимы просвечивания: рентгеновский аппарат РАП 160-5, анодное напряжение 120 кВ, ток 3 мА, время экспозиции 25 с, система беспленочной радиографии HD-CR 35. Зарядка кассеты: свинцовый экран 0,09 мм, фосфорная пластина Fuji SR, свинцовый экран 0,09 мм. Для контроля качества изображения использованы проволочные эталоны №11 из железа.

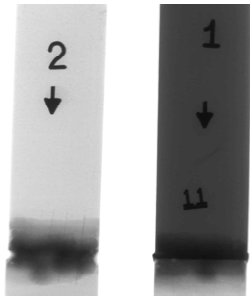


Рис.2. Цифровые изображения образцов 1 и 2

Для сравнения с традиционным методом рентгеновской радиографии образцы были сняты на рентгеновскую пленку D7 с использованием рентгеновского аппарата РУП150-300 (рис.3). Так как материалы исследуемых образцов значительно отличаются по плотности, было проведено три экспозиции; режимы просвечивания – фокусное расстояние $F=0.4$ м, анодное напряжение $U=120$ кВ, ток $I=5$ мА, время экспозиции $t_1=30$ с, $t_2=45$ с, $t_3=60$ с. Зарядка кассеты: свинцовый экран 0.09 мм, рентгеновская пленка, свинцовый экран 0.09 мм. Применялись проволоочные эталоны 13 из железа, проволоочный эталон 43 из титана и канавочный эталон №2 из титана. Полученная рентгеновская пленка отсканирована с использованием системы оцифровки и архивирования рентгеновских пленок и для удобства наблюдения приведена в позитиве.

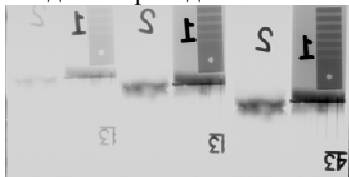


Рис.3.Рентгенограмма исследуемых образцов 1 и 2

Сравнение приведенных снимков показывает, что при практически одинаковом качестве изображений исследуемых образцов, метод беспленочной радиографии имеет ряд преимуществ перед радиографией на рентгеновскую пленку. Во-первых, для получения изображения беспленочный метод требует дозу рентгеновского излучения в 2-3 раза меньше, чем при традиционной радиографии, а во-вторых, для получения снимка объекта контроля требуется одна экспозиция независимо от плотности и толщин исследуемых материалов.

Предлагаемым методом был исследован образец сварки титана и нержавеющей стали, имеющий дефекты в виде цепочки мелких пор. Режимы просвечивания: рентгеновский аппарат РАП 160-5, анодное напряжение 120 кВ, ток 3 мА, время экспозиции 25 с, система беспленочной радиографии HD-CR 35. Зарядка кассеты: свинцовый экран 0,09 мм, фосфорная пластина Fuji SR, свинцовый экран 0,09 мм. Результат представлен на рис. 4. Снимок показал наличие дефектов в виде цепочки пор (1) в зоне сварного

шва в непосредственной близости от вставки (2). Для наглядности зона сварного шва образца 3 показана на рис.4 (b) в увеличенном виде.

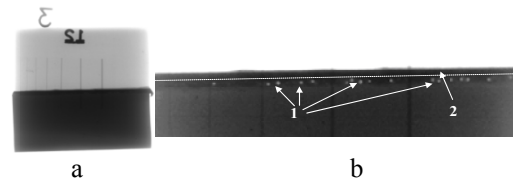


Рис.4. Цифровое изображение образца 3 (a – исходное изображение, b – увеличенное изображение зоны сварного шва)

Цепочка пор, видимая на снимке, расположена по линии вдоль сварного шва на расстоянии порядка 0,3 мм от нее. Размеры пор 0,1 – 0,4 мм, глубина залегания 0,6 -1,2 мм от поверхности. Измерения проведены в программе «Видеорен» по электронным изображениям сварных швов с предварительной калибровкой.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод об эффективности применения метода беспленочной радиографии для экспрессного контроля сварных швов из титана и его сплавов, а также сварных швов титана и более тяжелых металлов. Полученная в экспериментах относительная контрастная чувствительность составляет порядка 1 – 1,5 %, при экспозициях в 2-3 раз меньших, чем при традиционной радиографии на рентгеновскую пленку. При контроле обнаруживаются дефекты с раскрытием от 0,1 мм.

ЛИТЕРАТУРА

- 1.Неразрушающий контроль. Том 1. Справочник. Под общ. ред. В.В. Клюева, Кн. 2. Ф.Р. Соснин. Радиационный контроль, - М, 2006, 560с.
2. Майоров, А. А. Компьютерная радиография с использованием флуоресцентных запоминающих пластин // Технология машиностроения. - 2005. - N 7. - С. . 71-73.
- 3.Шигина Е.С., Будкеева С.А., Алхимов Ю.В. Беспленочная радиография сварных соединений с использованием переносного импульсного рентгеновского аппарата //Современные техника и технологии: XV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых / труды в 3-х томах - Томск, ТПУ. - 4 - 8 мая 2009. - Томск: Изд. ТПУ. - 2009 - Т. 3. - с. 223-225
- 4.Использование комплекса цифровой радиографии «Фосфоматик» и фосфорных пластин для радиографического контроля сварных соединений и наплавки технических устройств, применяемых на опасных производствах. Методическая инструкция И 246-098-2008. НПО ЦНИИТМАШ, 2008.
- 5.Science Imaging Systems // home.fujifilm.com/info/products/science/ip/

АКУСТОЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ (АЭМ) МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Кузнецов В.П., Кулешов В.К.

Кузбасский государственный технический университет Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
E-mail: vpk51@rambler.ru

Полимеры нашли широчайшее применение в создании различных композиционных материалов, которые используются в автомобилестроении, самолетостроении, космонавтике, ядерных установках и т. д. При создании изделий и конструкций на их основе возникает необходимость неразрушающего контроля их механических свойств. В ряду механических свойств большое значение имеет прочность клеевых соединений между склеенными слоями композиционной конструкции.

Очень часто в таких изделиях контролируемый клеевой слой имеет односторонний доступ, путь к которому лежит через аналогичные клеевые соединения, дефекты и изменения механических характеристик вышележащих слоев. В этом случае информация о контролируемом клеевом соединении маскируется или искажается.

Однако из работ [1, 2, 3] известно, что прочность клеевых соединений $\sigma_{ад}$ зависит от когезионной прочности адгезива σ_k и остаточных напряжений в нем σ_0 , если разрушение происходит по адгезиву то оно имеет вид:

$$\sigma_{ад} = (\sigma_k/\beta - \sigma_0)/\alpha,$$

где α , β – коэффициенты концентрации напряжений, обусловленные различием в механических свойствах адгезива с субстратом и макроскопической неоднородностью, соответственно.

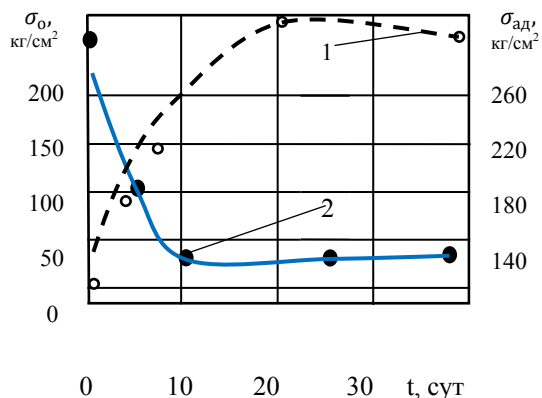


Рис.1. Зависимость внутренних напряжений σ_0 (1) и адгезионной прочности $\sigma_{ад}$ (2) для образца из полиэфирциануратного эмаль-лака – металл от продолжительности старения при 220°C [4]

Характер такой зависимости наглядно демонстрирует график, полученный для

полиэфирциануратного эмаль-лака из [4], приведенный на Рис.1. Этот график показывает, что с увеличением остаточных напряжений σ_0 резко падает адгезионная прочность. Аналогичные зависимости приводятся в работах [5, 6, 7]. Отсюда следует, что для контролируемого клеевого соединения достаточно измерять остаточные напряжения в нем, когда когезионная прочность клеящего полимера заранее известна.

Предложенный метод [8] активации клеящего полимера сегнеточастицами позволяет реализовать это положение. Метод: выделяет контролируемое клеевое соединение в многослойной композиционной конструкции; увеличивает достоверность получаемой информации о нем; измеряет параметра напрямую связанного с адгезионной прочностью.

Метод заключался в: приготовлении клеевого полимера с сегнеточастицами; склеивании деталей композиционной конструкции этим полимером; проведении полной полимеризации клеящего полимера; возбуждении в этом клеевом слое упругих волн; регистрации от возбужденного участка клеевого соединения электромагнитных волн и оценке прочности адгезии по характеристикам электромагнитных волн.

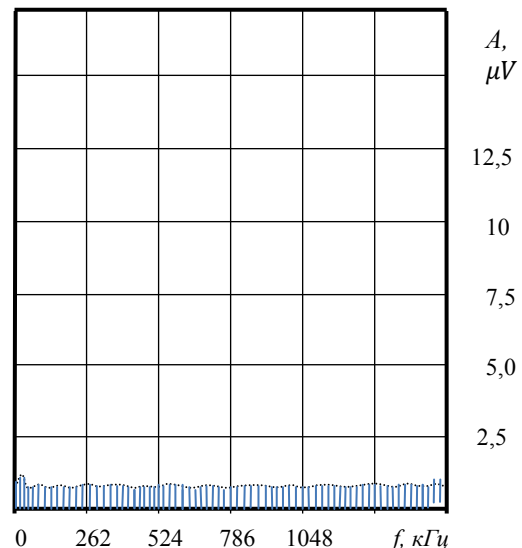


Рис.2. Спектрограмма электромагнитного излучения клеевого слоя, активированного хаотично ориентированными сегнеточастицами, возбуждаемая упругими волнами (белый шум)

Исследования показали, что клеевое соединение, полученное склеиванием клеящим полимером содержащим сегнеточастицы, при возбуждении упругими волнами не излучает электромагнитные волны. Этот факт отражен на Рис.2., который показывает, что электромагнитное излучение от такого клеевого соединения отсутствует, а антенна регистрирует так называемый белый шум.

Для преодоления этого препятствия было предложено [9] ориентировать сегнеточастицы вводимые в клеящий полимер. Так как частицы имеют дипольный электрический момент, то их ориентацию проводили с помощью электрического поля до полной полимеризации клеящего полимера. В результате частицы выстраивались в клеящем полимере таким образом, что их дипольные моменты ориентировались в одном направлении. Это позволило при возбуждении упругих волн в композиционной конструкции получить сигнал отклика от активированного клеевого слоя в виде электромагнитного излучения. Рис.3. отражает характерный электромагнитный сигнал такого образца.

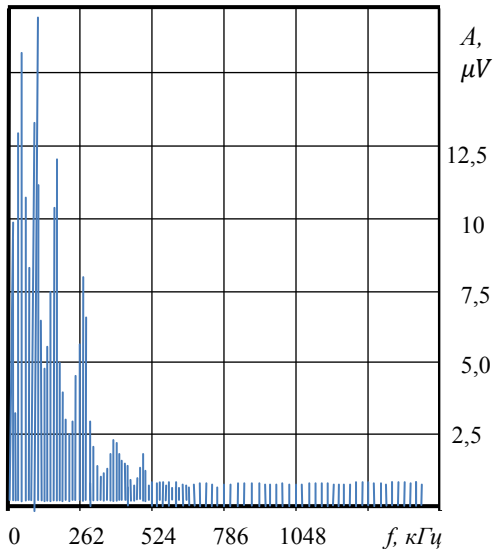


Рис.3. Спектрограмма электромагнитного излучения клеевого слоя, активированного сегнеточастицами дипольные моменты которых ориентированы в пространстве в одном направлении, возбуждаемая упругими волнами с аналогичным спектром

Схема установки [10] на которой производились эти исследования, изображена на Рис.4. Схема содержит: генератор электрических импульсов 1, излучатель упругих волн 2, образец, склеенный клеящим полимером и активированный сегнеточастицами 3, антенну 4, спектр анализатор или осциллограф 5. Генератор электрических импульсов генерирует прямоугольные импульсы длительностью 6 мкс,

напряжением 500 В, длительность нарастания переднего фронта импульса 0,15 мкс и частотой следования импульсов 50 Гц.

Образцы (металлические пуансоны) склеивались клеящим полимером, активированным сегнетокерамическими частицами марки ЦТС-23.

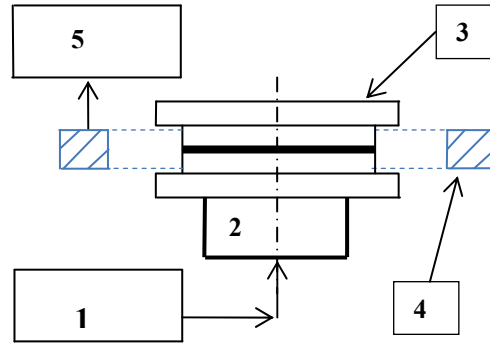


Рис.4. Схема установки для изучения акустоэлектромагнитного метода неразрушающего контроля клеевых соединений композиционных материалов

В качестве клеящего полимера брали эпоксидную смолу ЭД-5 или эластомер марки 88Н. Сегнетокерамические частицы ориентировались постоянным электрическим полем напряженностью 1000 В/мм в течение полимеризации клеящего полимера. Толщина клеящего полимера задавалась фторопластовой шайбой толщиной 0,2 мм.

Регистрацию электромагнитного излучения осуществляли широкополосными избирательными магнитными датчиками [11]. Визуализацию осуществляли анализатором спектра СК4-56. Спектры фотографировали. По фотографиям вычисляли площади спектров согласно выражению:

$$S = \sum_{i=1}^m A_{i_{ЭМВ}} \cdot \Delta\omega,$$

где $\Delta\omega, 2\pi/c$ — ширина элементарного участка на которые разбит весь спектр, A_i, mB — амплитуда спектра на i -м участке.

Далее образцы подвергались на механической машине Р-500 разрушению. Замерялась максимальная прочность разрушения образцов. На основании полученных данных построено поле экспериментальных значений Рис.5. Данные значения хорошо ложатся на ветви регрессионной линии. Ветвь, описывающая регрессию ЭМИ от прочности клеевого соединения для образцов склеенных эластомеров, имеет прямую зависимость и обозначены знаком « \circ ». Ветвь, описывающая регрессию ЭМИ от прочности клеевого соединения для образцов склеенных эпоксидной смолой, имеет обратную зависимость

и обозначены знаком « \circ ». Такое поведение регрессионного уравнения можно объяснить исходя из свойств сегнетоэластомера марки ЦТС-23. Согласно материалам публикации в работе [12] зависимость пьезомодуля d_{33} от всестороннего сжатия хорошо согласуется с представленными результатами экспериментов. Поэтому, на основании существующей зависимости пьезомодуля d_{33} от всестороннего сжатия T , можно полагать, что выявленная закономерность хорошо отражает имеющий место зависимость электромагнитного излучения от прочности клеевого соединения.

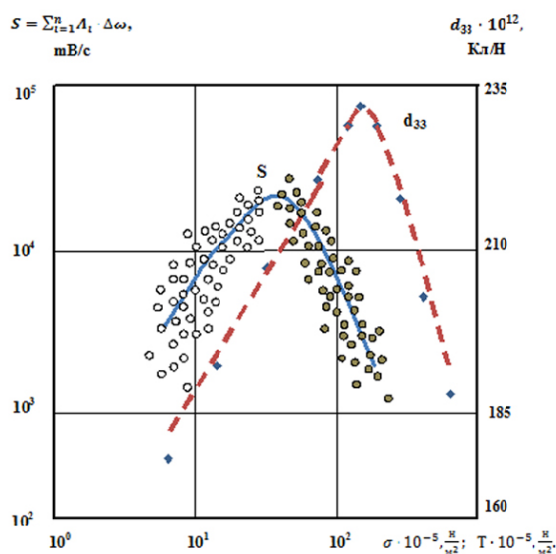


Рис.5. Зависимость мощности электромагнитного излучения от адгезионной прочности. \circ - образцы склеенные эластомером 88Н, активированным (10% по весу сухого полимера) частицами сегнетоэластомера ЦТС-23. \bullet - образцы склеенные стеклополимером ЭД-5, активированным (10% по весу) частицами сегнетоэластомера ЦТС-23

Представленные материалы экспериментальных исследований позволяют сделать выводы:

- ориентация сегнеточастиц, позволяющая выстроить их дипольные моменты в одном направлении, позволяет трансформировать упругие волны в электромагнитные контролируемым клеевым соединением.

- предложенный (акустоэлектромагнитный) метод неразрушающего контроля клеевых соединений позволяет выделять ответственный клеевой слой в многослойной композиционной конструкции;

- трансформация клеевым соединением упругих волны в электромагнитные происходит пропорционально остаточным напряжениям в нем, что позволяет судить о адгезионной прочности по известной физической зависимости;

- электромагнитное излучение клеевого слоя активированного сегнетокерамическими добавками имеет сильную корреляционную связь с адгезионной прочностью, что увеличивает достоверность информации о адгезионной прочности ответственного соединения.

ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bikerman J.J., The Science of Adhesive joints New. – Academic Press New-York and London: Library of Congress Catalog Card. Wamber 60-16906 Prinfend in the United States of America. 1961.
2. Бикерман Я.О. // Успехи химии. – 1972. – Т.41. – С.1431-1438.
3. Бикерман Я.О. // Высокмолекулярные соединения. – 1968. – Т.10А. – С. 874-881.
4. Берлин А.А., Басин В.Е. Основы адгезии полимеров. –М.: Химия, 1974. – 392 с.
5. Хрулев В.М. Прогнозирование долговечности клеевых соединений деревянных конструкций. –М.: Стройиздат, 1981. – 128 с.
6. Дерягин Б.В. Адгезия твердых тел. –М.: Наука, 1983. – 279 с.
7. Фрейдин А.С. Прочность и долговечность клеевых соединений. –М.: Химия, 1981. – 272 с.
8. А. с. СССР № 979987, МПК⁵ G01N29/04/ Способ контроля соединений в многослойных конструкциях. Тонконогов М.П., Омаров К.М., Ворожцов Б.И. – Оpubл. По заявке №3297364 08.06.1981.
9. А. с. СССР № 1054769, МПК⁵ G01N29/04/ Способ контроля клеевых соединений в многослойных неметаллических конструкциях. Боровиков А.К., Ворожцов Б.И., Кузнецов В.П., Омаров К.М., Тонконогов М.П., Шилин П.Е. – Оpubл. БИ 1983 г. № 42/(СССР).
10. А. с. СССР № 1352348, МКИЗ G01N29/04. Способ контроля клеевых соединений композиционных конструкций. – В.П. Кузнецов. – Оpubл. БИ 1985 г. № 42/ (СССР).
11. Кузнецов В.П. Акустоэлектромагнитный метод контроля прочности клеевых соединений. /Дис. На соис. Уч. Степ. К.т.н. – ТПИ, Кемерово, 1989.–155с.: ил. <http://www.twirpx.com/file/272241/>, <http://www.vpk555.narod.ru/akustoelektro.html/>
12. Сложевская Е.Г. и др. Пьезоэлектрическая керамика. – И.: Сов. Радио, 1971. – 200 с.

КВАЗИТОМОГРАФИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕКОНСТРУКЦИИ ЗОНЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕЩИН ПО РАДИОГРАФИЧЕСКИМ ПРОЕКЦИЯМ

Баранов В.А., Эверт У.* , Редмер Б*., Кренинг М.

Томский политехнический университет

*Bundesanstalt für Materialforschung und prüfung, г. Берлин, Германия

E-mail: ram1@mail.tomsknet.ru.

Исследованы возможности томографической реконструкции зоны формирования трещины.. Развита методика структурно-ориентированной фильтрации проекций с локальной группой SO (2). Проведена регуляризация остро некорректной задачи реконструкции зоны формирования трещины на основе предположения о пространственной однородности угловых распределений микротрещин. Предложены методы реконструкции пространственных распределений микротрещин

Трудности томографической визуализации трещин

Реальная трещина, даже в изолированной детали, которую (казалось бы) можно исследовать на стационарном томографе, представляет собой сложный объект, весьма неудобный для томографической визуализации, а соответствующая задача реконструкции является «некорректной» в своей крайней, гротескной форме. Как известно, трещина, будучи «планарным объектом», видна только лишь под определенными углами, и то на пределе разрешения. Вклад лучей под другими углами в общую луч-сумму даже предельно точная система измерения проекционных данных разрешить не в состоянии. Более того, даже при наличии такой измерительной аппаратуры, возникли бы непреодолимые трудности с подгонкой известных реконструктивных алгоритмов для визуализации трещин в силу резкого возрастания объема обрабатываемых данных. Тем не менее, реконструкция зоны формирования трещин все же может быть осуществлена [5,6] при некоторых дополнительных предположениях, анализ которых является темой данной статьи.

«Эффективное» пространственное распределение для микротрещин

Вопросы математической интроскопии и материаловедения, в частности, вопросы визуализации трещин и их зарождения тесно переплетаются. Трещины формируются в «критических» зонах при активизации таких факторов как вибрация, градиенты механических напряжений, температур и т.д. Проекционное изображение «трещины» до входа процесса ее формирования в критическую стадию допустимо рассматривать как результат суммирования проекционных вкладов от огромного количества микротрещин с размерами, не превышающими критические размеры (определяемые ее «критическим радиусом» r_c).

Положение микротрещины (или мелкой трещины с размерами порядка одного элемента изображения) можно задать ее декартовыми координатами (x, y, z) и ориентацией, например единичным вектором нормали $n(x, y, z)$ к плоскости трещины с соответствующими углами Эйлера (θ, φ) . Ориентация, в принципе, может быть произвольной $(0 \leq \theta \leq \pi, 0 \leq \varphi \leq 2\pi)$. Фактически, в силу симметрии микротрещин $(0 \leq \theta \leq \pi/2)$. Задача визуализации полей распределения микротрещин, включая (с определенным «весом») и мелких неопасных трещин, не является трехмерной как это имеет место в традиционной рентгеновской вычислительной томографии (ВТ), где объектом реконструкции является скалярное поле «коэффициента линейного ослабления рентгеновского излучения» $\mu(x, y, z)$. Восстанавливаемое поле может быть представлено в форме $M(x, y, z, \theta, \varphi)$. Более информативной была бы характеристика $M_c(x, y, z, \theta, \varphi)$, являющаяся мерой «материального вклада» в $M(x, y, z, \theta, \varphi)$ исключительно от трещин, таким образом, что

$$M(x, y, z, \theta, \varphi) = \mu(x, y, z) + M_c(x, y, z, \theta, \varphi) \quad (1)$$

Таким образом, необходимы какие-то способы «отстройки» от «классического» $\mu(x, y, z)$. При достижении этой цели можно также построить (путем интегрирования $M_c(x, y, z, \theta, \varphi)$ по θ и φ) некоторое «эффективное» пространственное распределение $M_{eff}(x, y, z)$, описывающего объемное распределение микротрещин со всевозможными ориентациями. К сожалению, такие томографические задачи в общем виде не решаются в силу неполноты исходной информации и (что более важно) в силу различной математической природы распределений $\mu(x, y, z)$ и $M_c(x, y, z, \theta, \varphi)$. В математических методах традиционной ВТ такие объекты как микротрещины и мелкие трещины попадают в «множество меры ноль» и не обнаруживаются методом ВТ.

Преимущества предпочтительной ориентации микротрещин для решения реконструктивной задачи

Формирующие трещину физические факторы, будучи макроскопически диссимметричными, приводят к предпочтительной ориентации микротрещин, например наиболее опасные трещины в сварном шве обычно расположены вдоль шва. Тогда, согласно принципу П.Кюри,

симметрия системы под действием внешнего фактора понизится и в ней появится больше определенности. Если речь идет о зоне формирования трещин, то распределение микротрещин по ориентациям перестанет быть изотропным и его энтропия понизится. Благодаря возникшей анизотропии становится возможной эффективная «отстройка» от проекционных вкладов от $\mu(x, y, z)$ на стадии преобработки проекций на основе структурно-ориентированной фильтрации [7] с локальной группой $SO(2)$ [1]. В этом случае появляется и принципиальная возможность решения задачи на основе тех же алгоритмов, которые в ВТ используются для реконструкции при малых углах обзора, например, методов нелинейного томосинтеза [4].

Пусть преимущественная ориентация задана единичным вектором $N(x, y, z) = const$. На практике это условие всегда отягощено шумами из-за случайных отклонений ориентаций воздействующего фактора от вектора N . При радиографическом исследовании сварных швов зона формирования трещин бывает видна в диапазоне углов θ до 10° и более. Благодаря такому разбросу по углам θ ($-\theta_{max} \leq \theta \leq \theta_{max}$) между реальными ориентациями $n(x, y, z)$ и $N(x, y, z)$ (для которых $\theta=0$) становится доступным набор разноракурсных проекций для томографии.

Тем не менее, и в такой постановке задача резко отличается от типичных задач ВТ. Допустим, число проекций равно K . Тогда на луч-суммах для K различных лучей, занумерованных индексом k ($k = 1, \dots, K$) и проходящих через одну и ту же точку (x, y, z) зоны, представлены проекционные вклады от микротрещин с разными ориентациями. В луч-сумму вносят вклад только те микротрещины на пути луча, для которых $n(x, y, z)$ перпендикулярно направлению луча. В этих условиях ситуация, когда все K лучей могут одновременно «коснуться» какой-то определенной микротрещины, весьма маловероятна (с учетом того, что для хорошей обусловленности задачи источники излучения должны быть выстроены преимущественно перпендикулярно трещинам т.е. вдоль вектора $N(x, y, z)$). Иначе говоря, здесь (в противоположность ВТ) фактически нет «материального пересечения» между луч-суммами, что лишает основы и саму томографическую визуализацию.

Предположение о пространственной однородности угловых распределений микротрещин

Выход из создавшейся ситуации может быть найден за счет предположения о том, что между проекционными вкладами от микротрещин разной ориентации существует статистическая связь, так, что вклад от одной ориентации вероятностно характеризует и вклады от всех других. Это может быть сформулировано более определенно как предположение о пространственной однородности

угловых распределений микротрещин в зоне формирования трещин, что согласуется с принципом Кюри.

Группа симметрии воздействующего фактора включает в себя всевозможные пространственные сдвиги, повороты относительно любой оси, параллельной N , отражения относительно любой плоскости параллельной N , а также иногда отражения относительно любой плоскости перпендикулярной N (например, при механическом растяжении образца). Группа сдвигов является ее подгруппой. На практике, в силу отмеченного углового разброса воздействий, эти симметрии не являются точными.

В качестве объекта воздействия будем рассматривать некоторую достаточно большую окрестность точки (x, y, z) объекта контроля (сравнимую с окном просмотра данных в пространственной фильтрации изображений), причем специфический интерес для исследуемой здесь реконструктивной задачи представляет угловое распределение векторов $n(\xi, \eta, \zeta)$ в этой окрестности, которое можно считать изначально изотропным (т.е. его группой симметрии является $SO(3)$). В результате воздействия изотропия нарушится, однако возникшая анизотропия не будет точно описываться группой, являющейся пересечением $SO(3)$ и группы сдвигов, что и проявляется в небольшом угловом разбросе ориентаций микротрещин ($-\theta_{max} \leq \theta \leq \theta_{max}$). Уширение диапазона углов видимости зоны обусловлено не только неточной симметрией воздействия, но также и неточной симметрией объекта, лишь приблизительно описываемой группой $SO(3)$. Таким образом, за счет обоих факторов возникшая анизотропия в угловых распределениях микротрещин является «ослабленной» (при точных симметриях наблюдалась бы «сильная» анизотропия с нулевым диапазоном углов видимости т.е. с $\theta_{max} = 0$). При этом пока нет оснований считать, что анизотропное распределение микротрещин $w(x, y, z, \theta, \varphi)$ в окрестности точки (x, y, z) будет также и неоднородным т.е. уместно предположить (в согласии с принципом Кюри), что оно инвариантно относительно сдвигов и, в действительности, не зависит от (x, y, z) . Поскольку возникшие в результате воздействия новые симметрии являются неточными, об инвариантности можно говорить только в статистическом смысле. Выразим это в форме теоретико-групповой статистической гипотезы.

$$w(x, y, z, \theta, \varphi) \approx W(\theta, \varphi) \quad (2)$$

Здесь $W(\theta, \varphi)$ некоторое «общее» для зоны распределение микротрещин по ориентациям, а значок « \approx » следует понимать как статистическое согласие законов распределения для

определенного уровня значимости ε при произвольных (x, y, z) и при всех допустимых размерах окрестностей. Проверку выражения (2) на основе какого-либо критерия согласия нетрудно организовать для уже решенной реконструктивной задачи. С другой стороны, допущения (2) могут использоваться как дополнительная «априорная информация» для решения этой же задачи.

Отметим, что гипотеза (2) проверяется в рамках «мягкой» математической модели [2,3], не требуя точного равенства в (2). Благодаря проявляющимся в задачах данного типа «неточным симметриям», принцип Кюри не может быть применен в его прямом смысле, однако он плодотворен как «эвристический принцип» при формировании статистических гипотез.

Заметим также, что распределения $w(x, y, z, \theta, \varphi)$ нормированы и поэтому формально взаимнонезависимы с полями локальных интенсивностей воздействия $I(x, y, z)$, непосредственно влияющих на развитие трещины в окрестности точки (x, y, z) . Рассуждения, проведенные выше для $w(x, y, z, \theta, \varphi)$, заведомо неприемлемы для $I(x, y, z)$.

Симметрии, являющиеся предпосылками для неточных инвариантностей (2) и определяемые вектором N , здесь уже не просто «неточны», а грубо нарушены Гипотезы типа (2) в данном случае не нуждаются в проверке.

Предположение о пространственной однородности $I(x, y, z)$ лишило бы смысла диагностику. Сам «объект воздействия» представленный полями $I(x, y, z)$ более сложен и «непредсказуем», чем при анализе $w(x, y, z, \theta, \varphi)$. В принципе, могут быть построены усложненные нелинейные модели, в которых бы учитывалась статистическая связь между $w(x, y, z, \theta, \varphi)$ и $I(x, y, z)$, однако их анализ выходит за рамки данной статьи.

Томографическая реконструкция распределений микротрещин по статистически взаимозависимым луч-суммам, со слабым «материальным пересечением»

В силу изотропности воздействующего фактора относительно любой оси, параллельной $N(x, y, z)$, соответствующая симметрия (определяемая группой SO(2)) свойственна и распределению $W(\theta, \varphi)$, иными словами, она не зависит от φ и может быть представлена как произведение двух нормированных распределений (отдельно по θ и по φ) в форме $W(\theta) (1/2\pi)$. Введем также функцию распределения $V(\theta)$ в интегральной форме так, что $\partial V(\theta)/\partial \theta = W(\theta)$, $V(-\theta_{max}) = 0$, $V(\theta_{max}) = 1$.

При регистрации проекций для каждого луча характерно свое множество угловых ориентаций «захватываемых» им микротрещин B , которое определяется положением луча (θ_B, φ_B) . Для

параллельных лучей множество B одно и то же. Оно является подмножеством «универсального» (в данной модели) множества $U \equiv (-\theta_{max} \leq \theta \leq \theta_{max}, 0 \leq \varphi \leq 2\pi)$, в котором однозначно описаны всевозможные ориентации микротрещин. С точки зрения теории вероятностей это пространство элементарных исходов. Введем меру $p(B)$, таким образом, что $0 \leq p(B) \leq p(U) = 1$ для каждого B . В данном случае мера может быть введена на основе распределения $W(\theta, \varphi)$. Заметим, что B в общем случае не является прямоугольной областью U в силу того, что появляется зависимость между θ и φ .

При томографической реконструкции луч-суммы для каждого из K лучей, проходящих через точку (x, y, z) , должны быть «эквализированы». Сущность эквализации в том, чтобы модифицированные таким образом луч-суммы были непосредственно пригодны для оценки по ним «эффективного» поля $M_{ceff}(x, y, z)$ – оценки «целого по части». Иначе говоря, необходимо луч-сумму b преобразовать в статистическую оценку общей плотности микротрещин в точке (x, y, z) и, таким образом, в проекционную оценку для $M_{ceff}(x, y, z)$. Для «эквализированной» луч-суммы b_e имеем

$$b_e = b / p(B) \quad (3)$$

Схема регистрации проекций строится таким образом, что оценки (3) осуществляются в зоне статистической устойчивости распределения $W(\theta, \varphi)$, и случай $p(B) = 0$ исключается. Варианты эквализации и расчета мер $p(B)$ для множеств B в конкретных схемах регистрации просты, но громоздки, поэтому в данной статье не приводятся. Будучи независимыми от объекта контроля, они вычисляются еще до томографической реконструкции и представляются в форме K двумерных массивов, соответствующих K проекциям. Оценки для распределения $W(\theta)$ могут быть получены различными способами непосредственно из проекционных данных. Возможна аппроксимация $W(\theta)$ нормальным распределением с использованием известного углового разброса $(-\theta_{max} \leq \theta \leq \theta_{max})$ для оценки дисперсии.

Несмотря на то, что природа томографической реконструкции $M_{ceff}(x, y, z)$ по луч-суммам со слабым (или вовсе отсутствующим) «материальным пересечением» совсем другая, чем в ВТ, условие (2) дает возможность осуществлять ее на основе «регулярных» алгоритмов ВТ или нелинейного томосинтеза [4].

Грубо говоря, $M_{ceff}(x, y, z) \Delta x \Delta y \Delta z$ описывает «количество микротрещин» всевозможных ориентаций в объеме $\Delta x \Delta y \Delta z$, при этом размеры $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ элементарного объема много больше размеров типичной микротрещины и сравнимы с размерами одного пикселя на проекционном

изображении. На самом деле, в $M_{ceff}(x, y, z)$ вносят вклад и мелкие неопасные трещины. Проблема разделения в радиационном контроле массивов микротрещин ниже критического радиуса и мелких трещин сложна и до сих пор не решена.

Результаты и выводы

Исследованы возможности квантомографической визуализации зон формирования трещин по радиографическим проекциям. Развита методика структурно-ориентированной фильтрации с локальной группой Ли для предобработки проекций. Разработаны алгоритмы предобработки с группой SO(2) с целью выявления и оценки анизотропии зарождающихся трещин на фоне интенсивных шумов и помех от низкочастотных компонент проекционных вкладов. Развита методика реконструкции интегральных пространственных распределений микротрещин с учетом всех их возможных угловых ориентаций. Проведена регуляризация остро-некорректной задачи реконструкции зоны формирования трещины на основе предположения о пространственной однородности угловых распределений микротрещин. Алгоритмы реконструкции многократно испытаны как в лабораторных условиях, так и при контроле компонентов объектов ядерной энергетики в процессе их работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вейль Г., Классические группы, их инварианты и представления. // М.: Иностранная литература, 1947 – 408 с
2. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа // М: Наука, 1981 . – 487 с.
3. Бордовский Г. А., Кондратьев А.С., Чоудери А.Д.Р. Физические основы математического моделирования // М: Академия, 2005 . – 320 с.
4. Ewert U., Baranov V., Borchard K. Cross-sectional imaging of building elements by new non-linear tomosynthesis technique using imaging plates and Co^{60} radiation // NDT & E International, Elsevier Science Ltd. – 1997. – V. 30. – № 4. – P. 243–248.
5. Ewert U., Redmer B., Müller J, Trobitz M, Baranov V. Mechanisierte Durchstrahlungsprüfung von Rundschweißnähten — Prüfung mediengefüllter Rohrleitungen und Tiefenlagebestimmung durch Tomosynthese // 23 MPA-Seminar «Sicherheit und Verfügbarkeit in der Anlagentechnik» mit dem Schwerpunkt «Verhalten von druckführenden Komponenten und Systemen bei erhöhten Belastungen», Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA), 1997 Universität Stuttgart, Band 23, SS. 13.1-13.14.
6. Баранов В.А., Бразовский В.В., Эверт У., Редмер Б. Структурно-ориентированная визуализация зон образования трещин в компонентах атомных электростанций // Естественные и технические науки, № 5, 2010, стр. 386-391.
7. Баранов В.А., Бразовский В.В., Ивженко О.О., Эверт У. Структурно-ориентированный подход к обработке изображений // Естественные и технические науки, № 5, 2010, стр. 407-413.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ СВАРКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Степанова Л.Н., Канифадин К.В.

ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина», 630051, Россия, г. Новосибирск, ул.

Ползунова, 21

E-mail aergrroup@ngs.ru

Основной причиной, снижающей технологическую прочность сварных соединений, являются дефекты, образующиеся при сварке. Для выявления таких дефектов используются различные методы неразрушающего контроля (НК). Для контроля сварных швов используются традиционные методы НК, такие как ультразвуковой (УЗ) и магнитный. Применение этих методов позволяет выявлять дефекты в сварных соединениях и определять их условные размеры. Однако традиционные методы НК обладают рядом недостатков. При этом для УЗ-метода требуется тщательная зачистка контролируемой зоны объекта контроля (ОК). Магнитный метод позволяет определять поверхностные и подповерхностные дефекты. Поэтому ведется поиск и разработка современных методов диагностики, осуществляющих контроль сварных соединений в реальном масштабе времени. Одним из них является метод акустической эмиссии (АЭ).

Метод АЭ позволяет не только обнаруживать дефекты на ранних стадиях развития, но и классифицировать их по степени опасности независимо от положения и ориентации в ОК. Он используется для работы в реальном масштабе времени и позволяет контролировать как небольшие, так и крупногабаритные сварные конструкции без их демонтажа. Эти преимущества делают метод АЭ незаменимым при контроле многопроходной сварки толстостенных конструкций [1-3].

Однако метод АЭ обладает низкой помехоустойчивостью. Известно, что до 95 % регистрируемых сигналов относятся к помехам и шумам, что не позволяет эффективно использовать все возможности данного метода. Для устранения этого недостатка необходимо разработать методику, позволяющую отделять сигналы АЭ от дефектов от шумов и помех. Для этих целей используются методы кластерного анализа [1-2].

Сегодня наиболее широкое распространение получил метод кластеризации по оцифрованной форме сигналов. Это объясняется тем, что цифровая форма является наиболее полной характеристикой, описывающей сигнал АЭ. Однако при всей достоверности объединения сигналов АЭ в кластеры, данный метод имеет один существенный недостаток – большие временные затраты. Объясняется это тем, что при проведении кластеризации подсчитывается

величина $N^2 a$, (где N – общее число сигналов; a – смещение), что резко снижает производительность АЭ-системы. Поэтому кластеризация по форме не может быть использована для контроля дефектов сварки в реальном масштабе времени.

Для сокращения времени кластеризация проводится по отдельному набору параметров. Основной задачей при этом является выбор оптимального набора информативных параметров сигнала АЭ, достаточного для наиболее полного описания формы исследуемого сигнала. За счет экспериментального перебора различных комбинаций основных параметров сигналов АЭ, было установлено, что наиболее полное представление о его форме можно получить при использовании координат точек локализации, доминантной частоты, числа осцилляций, времен прихода и скорости нарастания переднего фронта сигналов АЭ.

При этом кластеризация выполняется в два этапа. На первом этапе осуществляется объединение сигналов АЭ по координатам, а на втором – по выбранному набору параметров. В основу объединения сигналов по координатам положено предположение о том, что сигналы, излучаемые одним источником, должны иметь компактное расположение при локализации. В процессе объединения первый из зарегистрированных сигналов выбирается в качестве базового. Известно, что каждый регистрируемый сигнал локализуется с некоторой погрешностью, поэтому сначала определялась погрешность локализации базового сигнала. Она представлялась в виде суммы вкладов погрешностей измерения скорости звука ΔC и разности времен прихода ΔT_i сигналов АЭ на датчики пьезоантенны по их оцифрованной форме. Основы методики расчета погрешности представлены в [2].

Вклад величин ΔT_1 , ΔT_2 в погрешность локализации дефекта (Δ_x , Δ_y) записывается в следующем виде:

$$\Delta_x(\Delta_{T_1}, \Delta_{T_2}) = -A_1 \Delta_{T_1} (T_c + T_1) - T_1 A_1 \left(\frac{\partial T_c}{\partial T_1} \Delta_{T_1} + \frac{\partial T_c}{\partial T_{21}} \Delta_{T_2} \right),$$
$$\Delta_y(\Delta_{T_1}, \Delta_{T_2}) = -(T_1 + T_c) B_1 B_2 \Delta_{T_1} - (T_2 + T_c) B_1 \Delta_{T_2} - (T_1 B_1 B_2 + T_2 B_1) \left(\frac{\partial T_c}{\partial T_1} \Delta_{T_1} + \frac{\partial T_c}{\partial T_{21}} \Delta_{T_2} \right),$$

где x, y – неизвестные координаты источника сигналов АЭ; C – скорость звука; T_c – неизвестное время распространения сигнала до момента регистрации первым ПАЭ; T_1, T_2 –

времена прихода сигнала на два датчика пьезоантенны.

Аналитические выражения для частных производных $\frac{\partial T_c}{\partial T_1}$, $\frac{\partial T_c}{\partial T_2}$ находятся

дифференцированием решения системы триангуляционных уравнений для определения координат дефекта. Коэффициенты A_i , B_i вычисляются по следующим выражениям:

$$A_1 = \frac{c^2}{x_1}; B_1 = \frac{c^2}{y_2}; B_2 = -\frac{x_2}{x_1},$$

где x_1, x_2, y_2 – координаты ПАЭ, приведенные к первому принявшему датчику.

Аналогичным образом рассчитывался вклад составляющей погрешности скорости звука ΔC .

После расчета погрешностей по осям x и y из полученных значений выбиралась максимальная погрешность либо по x , либо по y . Выбранное значение погрешности в дальнейшем служило границей для отбраковки сигналов АЭ. На следующем этапе определялась функция расстояния d_E между двумя сигналами. В качестве одного из сигналов использовался базовый, а в качестве второго – по-очередно все l сигналов. Функции d_E находится как:

$$d_E(i) = \sqrt{(x_{баз} - x_i)^2 + (y_{баз} - y_i)^2}, \quad (1)$$

где $x_{баз}, y_{баз}$ – координаты локализации базового сигнала АЭ; x_i, y_i – координаты сигналов АЭ.

После расчета функций расстояния между базовым и остальными сигналами АЭ полученные значения сравнивались с максимальной погрешностью определения координат базового сигнала. Если значение функции было меньше, чем максимальная погрешность, то исследуемый сигнал принадлежит к тому же источнику, что и базовый. Если же значение, найденное из (1), больше, чем максимальная погрешность, то два сигнала принадлежат к разным источникам.

Второй этап кластеризации осуществлялся с использованием метода «ближайших соседей». Для определения принадлежности каждого из m сигналов к тому же кластеру, что и базовый сигнал, значения его четырех выбранных параметров поочередно сравнивались с параметрами базового сигнала. Если значения всех параметров сравниваемого сигнала находились в пределах ширины заданного интервала от значений базового сигнала, то предполагалось, что они принадлежат к одному кластеру. Если какой-либо из параметров выходил за установленные границы интервала, то считаем, что регистрируемые сигналы АЭ не принадлежат к одному кластеру, а, следовательно, относятся к разным источникам.

Ширина каждого установленного интервала задавалась, исходя из размаха значений данного параметра на всем множестве зарегистрированных сигналов АЭ, и определялась как:

$$l_j = \frac{\max |p_j^{(i)}| - \min |p_j^{(i)}|}{N_j},$$

где p_j – рассматриваемый параметр; l_j – длина интервала рассматриваемого параметра; N_j – выбранное число интервалов гистограммы; i – индекс сигнала АЭ.

Для обработки разработанного метода кластеризации были проведены экспериментальные исследования с использованием имитатора. Для этого датчик имитатора устанавливался в различных точках металлического листа. Причем амплитуда выходных сигналов изменялась в процессе регистрации. Для полученных данных выполнялась кластеризация по форме и набору параметров. Результаты кластеризации сигналов АЭ, записанных от имитатора, по форме и по параметрам сигналов показаны на рис. 1, а, б. Анализируя результаты, можно сделать вывод о том, что при кластеризации по параметрам было получено большее число кластеров. Это соответствует небольшому понижению точности предложенного метода. Однако при его использовании значительно сократилось время, затрачиваемое на кластеризацию.

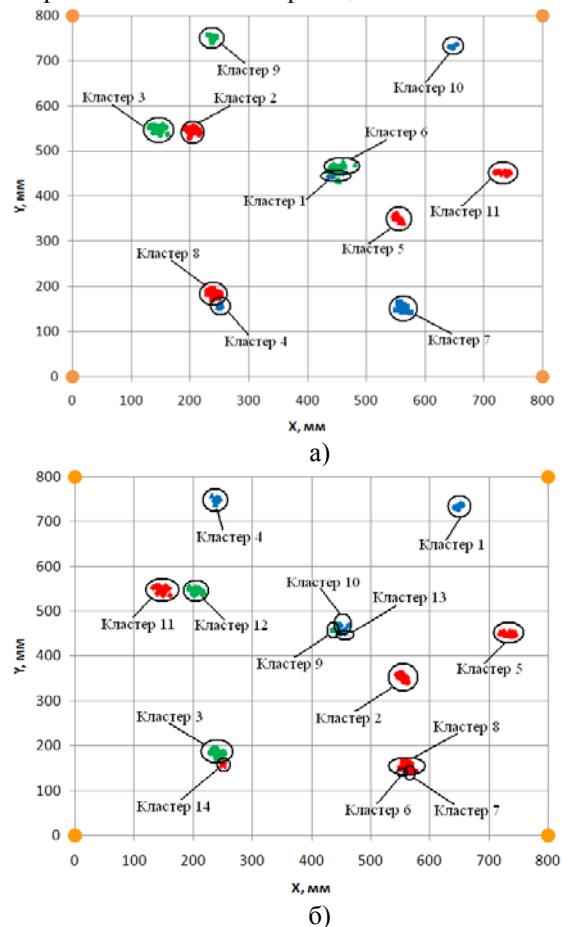


Рис. 1. Локализация сигналов АЭ: а – при кластеризации по форме; б – при кластеризации по параметрам

Промышленные испытания разработанного метода кластеризации проводились при сварке металлических образцов. При этом осуществлялась имитация дефектов путем добавления в сварной шов инородных включений в виде титановой и дюралюминиевой вставки. Запись сигналов АЭ начиналась с момента начала сварки и продолжалась в течение 10 минут после ее окончания. Затем была выполнена кластеризация полученных сигналов АЭ по набору параметров.

По результатам кластеризации все кластеры условно разделялись на три группы. К первой группе были отнесены кластеры, не имеющие ярко выраженной группировки точек локализации, когда сигналы распределялись хаотично вдоль сварного шва. Эти кластеры были исключены из дальнейшего рассмотрения, так как их невозможно было соотнести ни с одним из источников сигналов АЭ. Вторую группу составляли кластеры, сгруппированные по краям сварного шва, а третью – кластеры, расположенные в местах установки титановых и дюралюминиевых вставок (рис. 2). Эта группа кластеров была наиболее многочисленной.

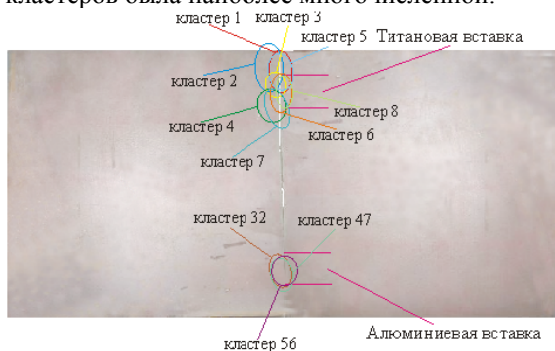


Рис. 2. Распределение кластеров вдоль шва для образца со вставками

После получения кластеров, соответствующих дефектам в сварном шве, выполнялась оценка степени их опасности. При анализе было принято предположение о том, что сигналы от развивающегося дефекта характеризуются высоким уровнем энергии. Поэтому в качестве основного параметра оценки степени опасности использовалась медиана распределения энергии сигналов АЭ в кластере.

Порядок оценки степени опасности полученных кластеров заключался в следующем. Сначала рассчитывалось значение медианы энергии всех входящих в кластеры сигналов АЭ и медиана всех зарегистрированных сигналов. После этого выполнялось сравнение значений медианы энергии в кластерах с медианой энергии всех зарегистрированных сигналов. В том случае, если медиана энергии кластера превышала медиану энергии всех зарегистрированных сигналов АЭ в установленное число раз, то считалась, что сигналы в дан-ном кластере

зарегистрированы от опасного развивающегося дефекта. Анализ энергетических параметров кластеров, представленных на рис. 2 показал, что в местах установки титановой и дюралюминиевой вставки имеются опасные дефекты.

Для подтверждения полученных результатов, участки сварного шва с обнаруженными дефектами были вырублены и направлены на металлографический анализ (рис.3). Исследования проводились в ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина». Внешний осмотр образцов показал, что сварные швы имеют неодинаковую высоту, а также присутствуют внешние дефекты в виде наплывов и подрезов. Для исследования поперечных шлифов в качестве реактивов использовалась смесь азот-ной и уксусной кислот. Проведенный анализ позволил определить наличие внутренних дефектов в сварных швах, таких как поры, цепочки пор на границе сплавления с основным металлом, шлаковые включения, непровары по сечению металла и по кромке шва [1-3].

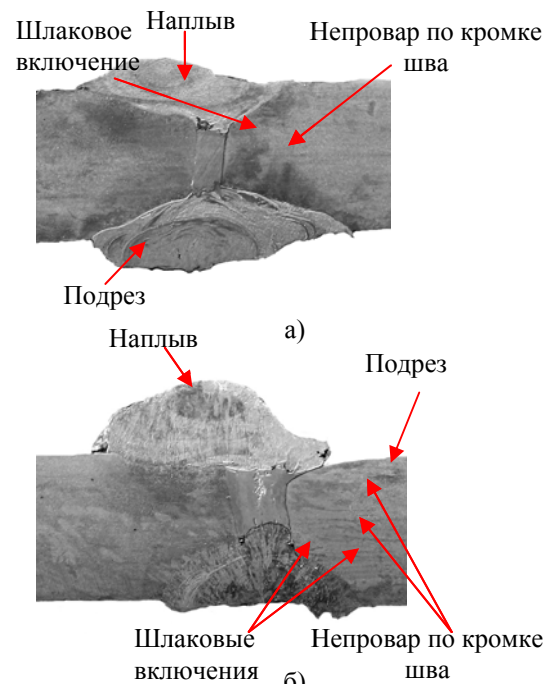


Рис. 3. Результаты металлографического анализа образца с титановой и дюралюминиевой вставкой

Полученные результаты металлографии подтвердили результаты АЭ-контроля. Таким образом, разработанная методика контроля сварки позволяет выявлять дефекты в сварных швах в процессе сварки и остывания.

На основании проведенных исследований было разработано программное обеспечение для АЭ-систем СЦАД-16.03, СЦАД-16.10, позволяющее автоматизировать процесс АЭ-диагностики сварных соединений и выполнять его в режиме реального времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанова Л.Н., Канифадин К.В., Лазненко С.А. Исследование источников сигналов акустической эмиссии при остывании сварного шва с использованием кластерного анализа // Дефектоскопия. 2010. №1. С. 73 – 82.

2. Акустико-эмиссионный контроль авиационных конструкций / Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И. и др. – М.: Машиностроение, 2008.- 440 с.

3. Акустико-эмиссионный контроль железно-рожных конструкций / Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Ивлиев В.В и др.– Новосибирск: Наука, 2011.- 272 с.

ACOUSTIC EMISSION DIAGNOSTICS OF DESTRUCTION STAINLESS STEEL PIPES ARISING WELDING

Apasov A.M.

Yurga Institute of Technology Branch of the National Research Tomsk Politechnik University, Postal Code 652050, Town Yurga, Leningradskaya Str 26
E-mail: mchmyti@rambler.ru

Introduction

It is reasonable to suppose that cracking arising on welding reduces the technological strength of the articles to a large extent. Therefore, with the aim of the more comprehensive and deep studying the conditions of crack nucleation and propagation and subsequent working out the recommendations to achieve the perfect welding technology, the cracks have been simulated in situ, directly in the physicochemical process of the welded structure formation.

It is well known such a method of casting the defective specimen (Patent of Sweden No. 376084, 1974), [1]. The components of preset geometrical form are dipped into the molten metal, their material having the higher melting temperature.

An alternative method of cracking defects simulating in a joint weld is to add some defect-forming additive (copper, titanium, and so on) into the molten metal. Referring to Ivanov and Belov (1981), this leads to AE level increase, associated with cracking in a joint weld on solidification [2]. The reason is that the atomic diameters of the additives are different from those of the base metal. For example, one can see from Grigorovich (1988), Ti, as an element of IV group of Periodic system, has the greater atomic diameter than Fe, being an element of VIII group [3]. This explanation is true for both the orbital diameters and the metallic one, i.e. metal bond lengths, as shown in Table 1 (Grigorovich, 1988), [3]. As one can see, the atomic diameters of Ti and Fe coincide with the orbital ones to a considerable extent. So, it should be determined generation of atomic bonds by superposition of the outside electron radii.

From the other hand, on crystallization of an alloy, the difference between Ti and Fe atomic diameters results in stresses arising in a crystal lattice and relaxing through microcracking.

Table 1

Metal	Ti	Fe
Orbital diameter ($d=2r$), A	2,92	2,45
Metallic diameter (metal bond length) d, A	2,954	2,52

In general terms, these simulating techniques are characterized by cracking based on the considerable differences between the crystallochemical and physical properties associated with the complex

limitation of the welded metal – a defect-forming additive interdiffusion. As a result, there develops chemical inhomogeneity and appear the brittle intermediate phases and compound.

Notwithstanding the fact the above mentioned techniques make it possible to simulate cracks at the quite arbitrary segments of the joint weld, it can not be said for them to be an adequate model of the real cracking process on welding those specimens the joint weld of which is formed without any additive only due to the molten metal of the weld-edges, and is therefore homogeneous one.

In this connection there rise the following questions:

1. What are the place and the manner in which there begins crack nucleation on welding?
2. What is dependency of the crack size on the crystallization parameters of the weld metal?
3. What are the conditions of cracking prevention?

The model of process

From the practical point of view, as seen from Fig.1, it should be studied melting and crystallization of the joint weld of a homogeneous-metal specimen with the thickness δ of a wall, taking into account intensive heat removal from a near-weld zone.

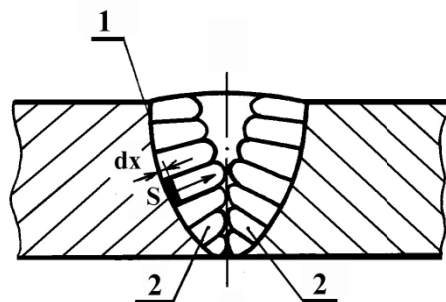


Fig.1. Scheme of metal crystallization of the weld cross-section 1-the melting zone, 2-the columnar crystal

At the very beginning there occurs a sharp-temperature jump: from the liquid-nitrogen temperature in a weld-forming zone to the temperature of the edges cooled on heat removal (Apasov, 1988), [4, 5]. There appear the randomly oriented crystallization centers on the liquid – solid boundary 1 which from a compact layer due to intensive cooling of a near-welded zone and begin to

grow inside the molten metal. It should be said that the heat conductivity values of monocrystals are not equal in the different directions therefore they grow more quickly the centers, with the higher heat conductivity coinciding in direction with the maximum temperature gradient, i.e. being perpendicular to the liquid-solid boundary. These crystals are growing into the molten metal in a columnar form. A scheme of this process is illustrated in Fig.1. There arises porous incompactness in a contacting zone of the oppositely growing crystals

2. Relaxation of thermoelastic stresses results in confluence of pores, hence in crack nucleation and growth up in a weld root. As seen, a crack propagates gradually along an axe line of the weld cross-section. Then it may be determined the mathematical dependence of the linear sizes of a crack on the crystallization parameters of the weld metal.

Let us take a face of the crystal with the area s on the liquid-solid boundary, draw the axe x as perpendicular to the face and denote the velocity of the face growth by v . For a little interval of time $d\tau$ there grows up a layer, dx thick, where

$$dx = v d\tau. \quad (1)$$

Let us denote heat of crystallization by ρ , density of crystallite by γ . For a time $d\tau$ at the crystallization temperature, there occurs liquid-solid transition of volume $dV = s dx$ or mass $dM = \gamma dV = \gamma s dx$. As a result, there liberates some head of melting and solidification being to

$$dQ_1 = \rho dM = \rho \gamma s dx \quad (2)$$

or to

$$dQ_1 = \rho \gamma s v d\tau. \quad (3)$$

On crystallization, there occurs heat removal essentially from the face through the liquid-solid boundary to the base metal. Let λ is heat conductivity factor of crystallite in direction perpendicular to the growing face, $\frac{dT}{dx}$ is the temperature gradient. Then, according to Furie equation, the amount of heat removed due to heat conductivity is equal to

$$dQ_2 = \lambda s \frac{dT}{dx} d\tau. \quad (4)$$

Since the necessary condition of crystallization proceeding with the velocity v should be $dQ_1 = dQ_2$, it follows from (3) and (4)

$$\rho \gamma s v d\tau = \lambda s \frac{dT}{dx} d\tau, \quad (5)$$

where

$$v = \frac{\lambda}{\rho \gamma} \frac{dT}{dx}. \quad (6)$$

Providing the constant crystallization time being $\tau = \tau_{kp}$, one can write (6) as

$$v = \frac{x}{\tau} = \frac{x}{\tau_{kp}} = \frac{\lambda}{\rho \gamma} \frac{dT}{dx} \quad (7)$$

What is shown in Fig.2.

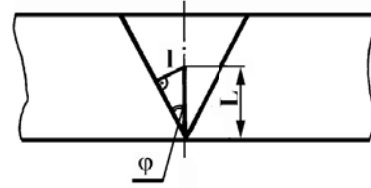


Fig.2. Geometrical demonstration of the weld cross-section

Is the inclination angle of a liquid-solid line to an axe line of the weld cross-section, degree; l is the length of the crystallite, m ; L is the length of a crack, m

It follows from there

$$x \frac{dx}{\tau_{kp}} = \lambda \frac{dT}{\rho \gamma} \quad (8)$$

or

$$\frac{1}{\tau_{kp}} \int_0^l x dx = \frac{\lambda}{\rho \gamma} \int_{T_0}^{T_{kp}} dT \quad (9)$$

Were l is the length of crystallite, m ; T_0 is the temperature on the boundary with the metal, °C; T_{kp} is the crystallization temperature, °C.

The net result is the following:

$$\frac{l^2}{2\tau_{kp}} = \frac{\lambda(T_{kp} - T_0)}{\rho \gamma}.$$

Consequently,

$$l = \sqrt{\frac{2\lambda\tau_{kp}(T_{kp} - T_0)}{\rho \gamma}}. \quad (10)$$

Then, the linear size of a crack may be determined as follows

$$L = \frac{l}{\sin \varphi} = \frac{1}{\sin \varphi} \sqrt{\frac{2\lambda\tau_{kp}(T_{kp} - T_0)}{\rho \gamma}}, \quad (11)$$

where φ is the inclination angle of a liquid-solid boundary to an axe line of the weld cross-section, degree.

It follows from (11) that

1. The greater is length of a crack, the smaller is angle φ , i.e. the smaller are both width of the weld and temperature T_0 of a near-welding zone.

2. The smaller is width of a crack, the greater are both welding zone and temperature T_0 of a near-welding zone. The higher is preheating temperature of the welded edges, the small is length of a crack. There is no cracking at $T_0 = T_{kp}$ at all.

As one can see (11), it is impossible to determine the value of φ beforehand, but only after welding in the following manner. On welding finish, it should be measured the half-width of the reinforced roll, as

shown in Figs. 1 and 2. Then, knowing the thickness of the welded specimens- δ -, it may be determined the hypotenuse (or the length of a liquid-solid boundary) according to Pythagorean theorem and, as a result, set up the relation of the half-width to the thickness of the joint weld and find the desired value of \sin .

The length of the columnar crystals is also calculated according to (11), i.e.

$$l = \sqrt{\frac{2\lambda\tau_{kp}(T_{kp} - T_0)}{\rho\gamma}}, \quad (12)$$

where all the parameters are determined by the literature sources and the reference books (for each material taken separately), excluding T which is experimentally preset.

Experimental results and discussion

The experiments have been carried out to simulate cracking on welding homogeneous-metal specimens. The traps were mounted on near-welded zone of the welded pipes, 20×2 mm in size. The pipes were produced from austenite corrosion-proof steel. The traps were cooled by liquid nitrogen. The welded edges were not dressed, the joint weld being formed due to its own metal.

It was carried out argon-arc welding using non-melting tungsten electrode made from the lanthan-doped rod, 2mm in diameter. One could detect AE signal by means of the welded head making it possible the fixed joint welds. The signal then came through the piezoconverter, set on the pipe, and the preamplifier to the sound detector. Here the signals were amplified and processed with the following control in the self-recorder in an analogue form.

At the same time there came a signal from the entry of the sound detector to the synchronous spectrum analyzer. It was possible to carry out the rapid filming by means of the recording photocamera, 9 sequences / sec in velocity. It follows from the analysis of videopulse that the most probable frequency range of AE signals is from 400 to 600 kHz. Besides, the videopulses were investigated on welding pipes made without any additive, 6×1 mm, 6×1,4 mm, 8,5×2 mm, 12×1,4 mm, 22×2 mm, 35×2 mm in their type sizes. It follows from the results of measurements, registration and rapid filming that there always begins crack nucleation in a welded root, the frequency range of AE pulses from cracks being from 400 to 700 kHz.

The multichannel amplitude analyzer was used to measure the energetic parameters of AE spectrum of cracking on welding and obtain the amplitude distributions of AE signals from the different constituents of welding and defect-formation as the industrial noises, electromagnet hindrance, motion of the welded head, ignition and burning of arc, melting and crystallization of the joint weld, cracking. It was found that AE signals obtained on melting,

crystallization and defect formation may be separated by the amplitude criterion. From the other hand, separation of AE signals obtained on crack nucleation is performed by AE pulses number, in the range of each channel of the analyzer. In particular, the maximum number of AE signals on melting and metal crystallization has been recorded in 12-th channel of the analyzer, the amplitude being 58,56 mV. It is shown in Fig.3.

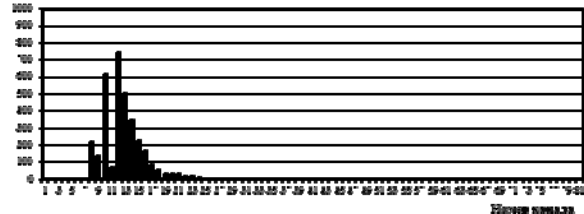


Fig.3. The amplitude distribution of AE signals from melting and metal crystallization at $t = 55,5$ sec (It is time of the welding cycle)

$J = 40A$ is the value of the welding current, $L = 240$ mm is the distance of AE recorder to the weld

At the same time the amplitude of AE signals on cracking recorded in 73-d channel of the analyzer was 356,24 mV (600 pulses), see Fig.4. It indicates the very high energetic of cracking nucleation and propagation as compared to melting and metal crystallization on welding.

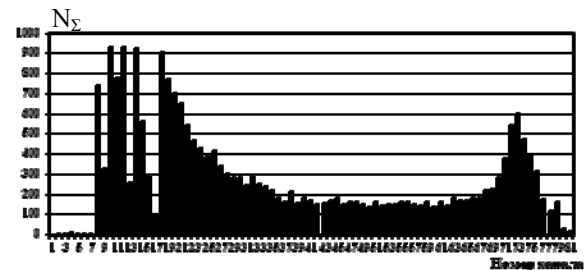


Fig. 4. The amplitude distribution of AE signals from cracking on welding as a result of liquid-nitrogen cooling of near-weld zone ($t = 55,5$ sec; $J = 40$ A; $L = 240$ mm)

The metallographic experiments have been carried out to confirm the cracking process. Figs. 5, 6 and 7 are the photos of the metal microstructure with a crack in a weld root observed with a scanning microscope at the different magnification.

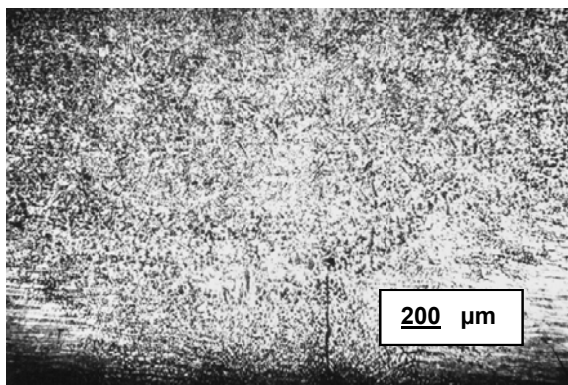


Fig. 5. The metal structure with a crack in a weld root: steel, observed with a optical microscope at $\times 50$ magnification

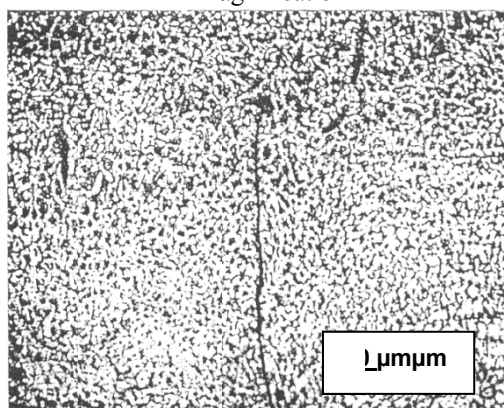


Fig. 6. The metal structure with a crack in a weld root: steel, observed with a optical microscope at $\times 200$ magnification

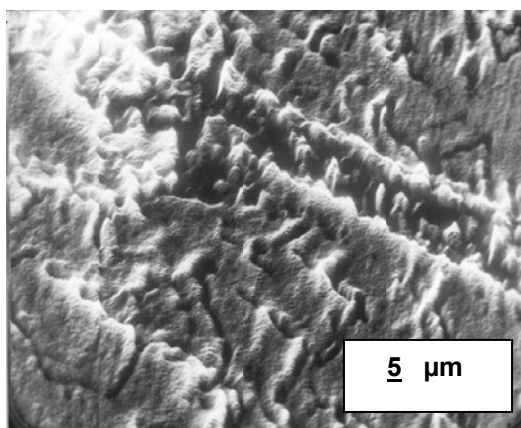


Fig. 7. The metal structure with a crack in a weld root: steel, observed with a scanning electron microscope at $\times 1800$ magnification

Conclusions

1. There begins crack nucleation in a weld root on welding of homogeneous-metal specimens.
2. The smaller is length of a crack, the greater are both a weld-formation zone and the temperature T

of a near-welding zone. The higher is preheating temperature of the welded edges, the smaller is length of a crack. At $T_0 \rightarrow T_{kp}$ the crack is absent at all.

3. The frequency range of AE pulse on cracking is from 400 to 700 kHz.

REFERENCES

1. Patent of Sweden No. 376084 (1974), MCP 4G01N29/04. Anordning för bedömning av materialfel vid ultraljud-undersökning / Boström E. Y. ; Motala Verkstad AB [SE]. – Declared 05.10.1972 ; publication 05.05.1975. – 4 p.
2. Ivanov V.I. Acoustic Emission Control of Welding and the Joint Weld / V.I. Ivanov, V.M. Belov. – Moscow, «Mashinostroenie», 1981. – 184 p.
3. Grigorovich V.K. The Metallic Interaction and Structure of Metals / V.K. Grigorovich. – Moscow, «Nauka», 1988 – 296 p.
4. Author certificate No. 13741123 (1986), MCP 4G01N29/04. The method of Apasov A.M. Study of Cracking on Welding of Homogeneous-Metal Specimens / A.M. Apasov. – Declared 06.05.1986; publication 15.02.1988 in Report of Inventions No. 6. – 4 p.
5. Apasov A.M. Active diagnostic of destruction and prevention of the technological catastrophes. / A.M. Apasov. – Tomsk, 2010. – 216 p.

ПЕРСПЕКТИВЫ И НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ НА НАНОЭЛЕКТРОДАХ

Авдеева Д.К., Лежнина И.А., Малый М.В., Пеньков П.Г., Садовников Ю.Г., Уваров
А.А., Фролов М.Д.

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30

E-mail: medpribor@introscopey.tpu.ru

По оценкам Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), в 2004 году от сердечно - сосудистых заболеваний (ССЗ) умерло 17,1 миллиона человек, что составило 29% всех случаев смерти в мире. Из этого числа 7,2 миллиона человек умерло от ишемической болезни сердца (ИБС) и 5,7 миллиона человек - в результате инсульта. Ни по какой другой причине ежегодно не умирает столько людей. Более того, согласно прогнозу ВОЗ к 2030 году от ССЗ умрет еще около 23,6 миллионов человек [1].

Ситуация в России также является неутешительной. Несмотря на заявления о снижении уровня смертности от ССЗ [2], количество больных остается чрезвычайно высоким. Так по данным Минздравсоцразвития в 2008 и 2009 годах на 100000 россиян приходилось, соответственно, 22050,2 и 22477,2 человек с болезнями системы кровообращения [3].

Кроме того, для России актуальна и другая сторона проблемы – быстрое «омоложение» ССЗ. Согласно данным академика Е.И. Чазова, вдвое чаще стали страдать ССЗ люди в возрасте от 25 до 35 лет.

В такой ситуации развитие технологий и методов диагностики и лечения ССЗ является не только вопросом развития отрасли, но и фактором национальной безопасности в целом.

Как и большинство болезней, заболевания сердечно - сосудистой системы достаточно легко излечимы на ранних стадиях. Однако, выявить ССЗ «в зачатке» не только чрезвычайно сложно, но и фактически невозможно при отсутствии специальных средств диагностики. Особо трудно диагностируемыми являются ранние стадии ишемической болезни сердца, проявляющие себя в незначительных отклонениях по уровню и времени ST-комплекса кардиограммы.

Основные цели любой системы здравоохранения – оказание населению доступной, качественной медицинской помощи, улучшение состояния здоровья общества в целом и каждого гражданина в отдельности.

Амбулаторно-поликлиническая помощь, ведущее звено отечественного здравоохранения, должна получить в XXI веке дальнейшее развитие и совершенствование. От состояния амбулаторно-поликлинической помощи зависят эффективность и качество деятельности всей системы здравоохранения, сохранения, а также решения большинства медико-социальных проблем, возникающих на уровне семьи.

Современная электрокардиография должна обеспечивать

- доступность;
- наблюдение за здоровьем человека и общества;
- наблюдение пациента в течение всей жизни, а не только в период болезни.

Электрокардиографическая помощь должна включать профилактику и диагностику, но в последние годы она все больше становится ориентированной на синдром боли. Человек только тогда идет к врачу, когда у него что-то заболело.

Профилактика – первейшая обязанность самого человека, что признается во всем мире и у нас в России.

Все вышесказанное обозначило современные пути развития электрокардиографии – ЭКГ высокого разрешения (ЭКГ ВР), ЭКГ-картирование, теле-ЭКГ и др. Так или иначе, точность диагноза напрямую зависит от качества и количества исходной информации. Повышение этих параметров является главной целью всех современных направлений электрокардиографии.

Современные методы зачастую «выигрывают» на количестве информации – производится большее число измерений и их различное комбинирование в процессе сложной обработки.

Качество же информации, в основном, определяется отношением сигнал/шум и повысить его можно за счет совершенствования аппаратно-программной части и, прежде всего, самих медицинских электродов. В свое время хорошим решением стало применение хлор-серебряных электродов, но и они уже не удовлетворяют возрастающим требованиям.

В связи с этим в лаборатории медицинского приборостроения института неразрушающего контроля ТПУ в течение нескольких лет ведутся работы по повышению разрешения не только отдельных элементов ЭКГ аппаратуры, но и всего комплекса в целом. Применение наноразмерных частиц серебра в конструкции электрода позволило достичь многократного повышения метрологических характеристик. В совокупности с разработкой малошумящих регистрирующих приборов удалось достичь повышения разрешения сигнала до сотен нановольт (при общепринятых десятках и сотнях микровольт).

Реально достижимое разрешение сигнала по уровню в (100-200) нВ в перспективе дает все

основания для значительного повышения диагностической ценности электрокардиографии.

Современные нанотехнологии и наноматериалы открыли новые перспективы для создания медицинских электродов - наноэлектродов, имеющих на порядок более высокую стабильность электродного потенциала, низкие и стабильные контактные и поляризационные потенциалы, напряжение шума нановольтового уровня и малое сопротивление электрода и кожа-электрод.

Более высокие метрологические характеристики наноэлектродов открывают перспективы для создания нового поколения медицинской электрокардиографической аппаратуры, работающей в расширенном частотном диапазоне, начиная от постоянного тока, и имеющую повышенную разрешающую способность, позволяющую исследовать изменения биоэлектрической активности органов, тканей и систем человека в нановольтовом диапазоне без накопления, а следовательно, появляется возможность более ранней диагностики сердечно-сосудистых заболеваний, в том числе и ишемии миокарда.

Обычно для исследования по Холтеру используют приклеивающиеся одноразовые хлор-серебряные электроды. Однако эти электроды под воздействием биоэдс мышц, возникающих в процессе жизнедеятельности человека, поляризуются. По этой причине необходимы фильтры, ограничивающие сигналы в области низких частот, либо разрабатывают следящую систему на цифро-аналоговых преобразователях для компенсации постоянной составляющей биоэдс во входной цепи. Чаще всего идут по пути ограничения полосы пропускания измерительной системы. Второй вариант применяют в приборах высокого разрешения, схема усложняется, содержит большее количество электронных компонентов, которые приводят к увеличению уровня базового шума и к снижению чувствительности. Постоянное напряжение на выходе ЦАПа в следящей системе создаёт постоянные токи, протекающие через электроды, поляризуя их.

Наноэлектроды не поляризуются мышцами, в них можно бегать, выполнять любую физическую работу, заниматься спортом. При этом внешне они выглядят как обычные электроды (рис.1), имеют малый вес. Хлор-серебряные наноэлектроды находятся в порах керамики и не стираются при длительной эксплуатации, сохраняя высокие метрологические характеристики. По этой причине их можно применять длительное время в постоянно носимых аппаратах и в обычных электрокардиографах, рабочую поверхность наноэлектродов можно подвергать дезинфекции стандартными методами.

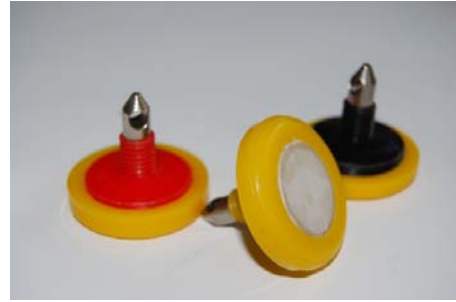


Рис.1. Наноэлектроды конечностные, которые устанавливаются на конечностях (левая рука, правая рука, левая нога, правая нога) с помощью специального зажима «клипсы»

Одноразовые приклеивающиеся электроды в постоянно носимых аппаратах применять нельзя из-за поляризации электродов мышцами при движении и раздражения кожи клеевой основой, в аппаратах индивидуального применения - дорого.

Другая составляющая этой проблемы – это качество диагностики, которое определяется качеством разработанного устройства. Главное – выявить ранние отклонения в работе сердца. Диагностика только по частоте ритма сердца недостаточна для ранней диагностики, необходимо измерение низкоамплитудных зубцов ЭКГ, сдвига S-T комплекса, необходима разработка новых технологий обработки слабых сигналов, одним словом разрабатывать аппаратуру низкого качества для широкого применения не имеет смысла.

Наноэлектроды позволили поднять разрешение как по уровню, так и по частоте. Электрокардиограмма и электроэнцефалограмма в полосе от 0 до 10000 Гц, зарегистрированные без фильтров, отличаются от стандартных.

Электрокардиограмма и электроэнцефалограмма в полосе от 0 до 10000 Гц, зарегистрированные без фильтров монополярным способом, отличаются от сигналов, зарегистрированных биполярным способом (происходит вычитание сигналов). Особенно способ отведения и наличие фильтров влияют на низкоамплитудные сигналы микровольтового уровня.

В настоящее время одним из направлений развития электрокардиографии является анализ низкоамплитудных потенциалов, возникающих на электрокардиосигнале. Низкоамплитудные

потенциалы заключают в себе важную диагностическую информацию о состоянии сердца пациента. Во многих случаях даже сам факт их наличия на ЭКГ позволяет повысить качество и информативность диагноза. Тем более важно не только зафиксировать низкоамплитудные сигналы, но и измерить их параметры.

Проблема регистрации таких сигналов заключается в том, что на обычной электрокардиограмме они теряются на фоне шума, так как их максимальная амплитуда не превышает 30 мкВ.

Эта задача требует создания аппаратных и программных средств с повышенной разрешающей способностью с целью выявления ранних сдвигов в функционировании сердца человека по результатам измерения ЭКГ-сигнала в системе массового обслуживания.

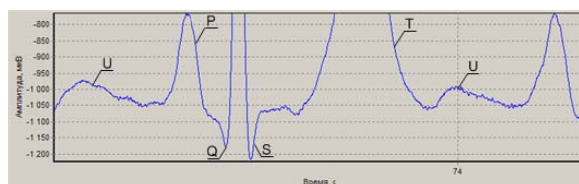
На базе нанoeлектродов разработана высокочувствительная аппаратура для измерения сигналов биоэлектрической активности различных органов и тканей человека, имеющая следующие параметры:

- диапазон входных напряжений от ± 2 мкВ до ± 20 мВ (по ГОСТ 19687-89 от 0,03 мВ до 5 мВ);
- уровень внутренних шумов от пика до пика – от -1 мкВ до +1 мкВ;
- диапазоны частот – (0-20)/(0-40)/(0-75)/(0-100)/(0-10000) Гц;
- частота квантования – 200/500/1000/2000 Гц;
- число каналов – 1, 3;
- число электродов -3,7;
- запись на флэш с объемом памяти – 2 Гб;
- часы реального времени;
- питание от аккумуляторных батарей;
- длительность исследования – сутки.

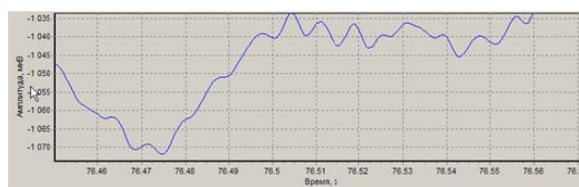
Аппаратура выполнена на базе дельта-сигма АЦП AD7731, шумы которого составляют ± 1 мкВ.

Однако для измерения сигналов, имеющих уровень единиц и нескольких десятков мкВ, необходимо поднять разрешение измерительной аппаратуры для более точного измерения малых сигналов. С этой целью разработан высокочувствительный канал на базе дельта-сигма АЦП AD 7731 с максимальным коэффициентом усиления 32 со ступенькой квантования, равной 20 нВ, с диапазоном измерения от -20 мВ до + 20 мВ в интервале частот от 0 Гц до 100 Гц.

Записи электрокардиограммы разработанным устройством с максимальным коэффициентом усиления 32 в полосе частот от 0 до 100 Гц представлены на рисунках 2а,б: на рисунке 2а – зубцы P,Q,S,T,U, на рисунке 2б – фрагмент записи в увеличенном виде.



а)



б)

Рис. 2 а, б Записи электрокардиограммы, коэффициент усиления 32: а) зубцы P,Q,S,T,U б) фрагмент записи в увеличенном виде

В медицинские учреждения пациенты приходят с симптомами заболеваний, здоровые люди в поликлиники не ходят. Симптомы могут проявиться поздно. Как решить эту задачу, не нарушая обычную систему взаимоотношений «врач-пациент», то есть как создать медицину будущего?

Человек должен быть активным участником медицины будущего благодаря компьютеризации населения и иметь право следить за своим здоровьем самостоятельно.

Для этого человек должен быть вооружен специальными высококачественными простыми в применении аппаратно-программными средствами для оценки состояния сердца, мозга (инфаркты, инсульты) с записью данных регистрации в автоматизированную базу данных, цена которых должна быть приемлемой для населения.

При наличии отклонений в записи электрофизиологических сигналов немедленно сообщать врачу о результатах исследования.

Носимые аппараты нужны не только для здравоохранения, но также для людей, работающих в экстремальных условиях (проблема «жив-мертв») либо под воздействием различных физических факторов (в космосе, под водой, при тушении пожаров, при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, при проведении военных действий).

На нанoeлектродах получена самая простейшая схема (нанoeлектрод - АЦП-микроконтроллер – флэш - ПК). Такой же простейший прибор создан нами и для исследования мозга человека «Электроэнцефалограф на нанoeлектродах», работающий в полосе от 0 до 100 Гц и имеющий нановольтовое разрешение.

Применение в электрокардиографах в качестве датчиков нанoeлектродов позволило на порядок улучшить их технические характеристики (не уступающие дорогим ЭКГ-аппаратам,

применяемым в отделениях кардиологии) и создать недорогой и простой в использовании ЭКГ-аппарат для применения в домашних условиях.

На данный момент не существует портативных ЭКГ-аппаратов для индивидуального применения в домашних условиях с техническими характеристиками, сопоставимыми с ЭКГ-аппаратами, используемыми в отделениях кардиологии и др. медицинских учреждениях, простых в использовании (т.е. не требующих специальной квалификации), а также доступных по цене обычному человеку.

На ранке имеются электрокардиографы для домашнего использования, основная функция которых ограничена лишь диагностикой различных видов аритмий, данные аппараты не имеют возможности обработки зубцов ЭКГ из-за грубой разрешающей способности

Наноэлектроды позволят российским производителям медицинской техники и средств диагностики создать конкурентоспособную отечественную продукцию, превышающую по технико-экономическим и потребительским показателям аналогичную продукцию зарубежного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сердечно - сосудистые заболевания. Информационный бюллетень №317. // Сайт Всемирной организации здравоохранения [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs317/ru/index.html>. – Загл. с экрана.

2. В России смертность от сердечно-сосудистых заболеваний за последние три года снизилась на 7,5 проц. // Агентство медицинской информации АМИ-ТАСС. [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://ami-tass.ru/article/75978.html>. – Загл. с экрана.

3. Общая заболеваемость на 100 000 человек населения. Всё население. Предварительные данные. // Сайт ФГУ «ЦНИИОИЗ Минздравсоцразвития РФ» [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://www.mednet.ru/ru/statistika/zabol-evaemost-naseleniya.html>. – Загл. с экран

ЛАЗЕРНЫЙ МОНИТОР В ЗАДАЧАХ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Евтушенко Г.С., Губарев Ф.А., Тригуб М.В., Торгаев С.Н.

Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Институт оптики атмосферы СО РАН, 634021, г. Томск, пл. Академика Зюева, 1
E-mail: gfaddtpu@tpu.ru

В ряде задач неразрушающего контроля необходима визуализация быстропротекающих процессов, в том числе экранированных от наблюдателя мощной фоновой засветкой. Такие процессы протекают в зонах взаимодействия мощных потоков энергии с веществом (лазерная обработка материалов, газоразрядное напыление пленок, модификация поверхности воздействием электронных пучков, облучение биотканей концентрированными потоками энергии), при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе (СВС), в плазме разрядов и т.д. Наблюдение таких процессов возможно либо с использованием лазерной подсветки, либо с помощью активных оптических систем с усилением яркости. Первый метод предполагает применение светофильтров для наблюдения в ограниченной спектральной области и является более простым, однако его применение возможно не всегда. При лазерной подсветке на объекте фокусируется мощное излучение, которое, с одной стороны, может исказить реальную картину процесса, с другой стороны, вызвать деструктивное воздействие.

Накладывает ограничение и максимальная температура объекта наблюдения, поскольку становится существенной мощность засветки в наблюдаемой спектральной области. Поэтому, в таких случаях целесообразно применение лазерных мониторов или лазерных проекционных микроскопов на основе высокочастотных лазеров на парах металлов [1–7]. Благодаря высокому коэффициенту усиления активной среды можно снизить мощность излучения, падающего на объект от усилителя яркости, до единиц милливатт.

Основой лазерного монитора является импульсно-периодический усилитель яркости на парах меди или его аналог на парах бромида меди. Такой усилитель излучает на двух длинах волн в зеленой (510,6 нм) и желтой (578,2 нм) областях спектра. Принцип действия лазерного монитора (термин введен авторами работы [2]) аналогичен работе лазерного проекционного микроскопа [1]: наблюдаемый объект подсвечивается собственным свехизлучением усилителя яркости, отраженный от объекта наблюдения сигнал усиливается и проецируется на экран, либо на CCD матрицу цифровой камеры. Лазерным монитором, по сути, является лазерный проекционный микроскоп, который используется для наблюдения яркосветящихся объектов в режиме реального времени и в оптическую схему

которого входит камера для регистрации изображений. Типовые схемы лазерного монитора показаны на рис. 1. Запись может осуществляться либо с экрана (рис. 1, а), либо напрямую путем фокусировки изображения на CCD матрицу видеокамеры (рис. 1, б, в).

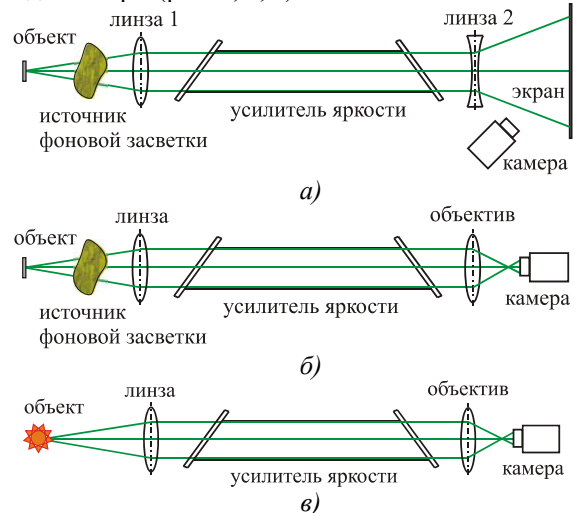


Рис. 1. Схемы лазерного монитора:
а, б – внешняя засветка, в – собственная засветка

Для наблюдения быстропротекающих процессов лазерный монитор должен регистрировать некоторое количество изображений за время процесса, причем, чем больше это количество, тем больше информации мы можем получить об объекте наблюдения. Временная разрешающая способность лазерного монитора ограничена, с одной стороны, частотой следования импульсов (ЧСИ) усилителя яркости, с другой стороны, предельной скоростью съёмки камеры. Лазеры на парах бромида меди с активными добавками (H_2 , HBr) имеют преимущество перед классическим лазером на парах меди, которое заключается в более высоких оптимальных (10–30 кГц, в отличие от 5–15 кГц для Cu -лазера) и максимальных ЧСИ, которые достигают 400 кГц [8]. Соответственно, и частотный потенциал лазерных мониторов на основе усилителей яркости на парах $CuBr$ выше, чем аналогичных систем на основе усилителей яркости на парах чистой меди. Использование усилителей яркости на парах бромида меди и современных скоростных фоторегистраторов (CCD камер) дает практическую возможность высокоскоростной съёмки (более 10^5 кадров в секунду) при времени экспозиции единицы–десятки наносекунд.

Известные авторам активные оптические системы на основе усилителей яркости на парах металлов, используемые для наблюдения динамики процессов, включают в себя усилитель яркости на парах меди, необходимую оптику и видеокамеру с частотой регистрации меньше частоты работы оптического усилителя, при этом съемка производится асинхронно импульсам сверхсветимости усилителя.

При создании лазерного монитора с высоким временным разрешением и минимальными искажениями, который будет востребован в задачах неразрушающего контроля, предпочтительно использовать высокочастотный CuVg-лазер и высокоскоростную регистрирующую аппаратуру, причем их работа должна быть синхронизована, т.е. каждый кадр должен формироваться одиночным импульсом сверхсветимости. Для решения поставленной задачи разработана система синхронизации работы усилителя яркости и скоростного регистратора. Причем, управление затвором камеры осуществляется от источника накачки оптического усилителя. Схема лазерного монитора с возможностью поимпульсной регистрации изображения показана на рис. 2. В экспериментах использовались скоростные видеокамеры MotionPro X3 (Redlake) и HiSpec 1 (Fastec Imaging) с возможностью внешней синхронизации.

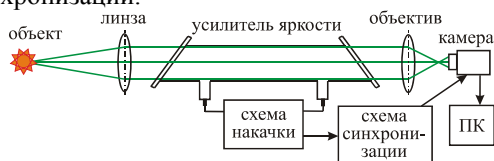


Рис. 2. Схемы лазерного монитора с системой синхронизации

В своих работах мы используем активные элементы лазеров на парах бромида меди, разработанные и изготовленные в лаборатории квантовой электроники Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (ИОА СО РАН) [9]. В частности, работы по наблюдению динамики процессов в единичных импульсах сверхсветимости ведутся с использованием малогабаритного усилителя яркости на основе CuVg-лазера с транзисторным коммутатором. Характеристики активного элемента: апертура газоразрядной трубки 1,5 см при длине активной области 40 см, ЧСИ 28,8 кГц, длительность импульса сверхсветимости 40 нс, энергия в импульсе 2,7 мкДж. Энергия импульса спонтанного излучения (собственного шума усилителя), оцененная по аналогии с работой [10], составила 0,034 нДж.

Зная параметры усилителя и оптической схемы лазерного монитора, с использованием формулы Планка можно оценить максимальную температуру объекта наблюдения, при которой

энергия фоновой засветки не оказывает влияния на работу усилителя яркости, а значит, на качество получаемого изображения. На рис. 3 представлены расчетные зависимости энергии излучения засветки от температуры источника засветки. В случае, когда засветка создается внешним источником (рис. 1, а, б), максимальная температура источника засветки, до которой возможно наблюдение с помощью лазерного монитора, достигает ~ 25000 К (рис. 3, а). В случае, когда объект сам является источником засветки (рис. 1, в), энергия засветки достаточно мала в широком диапазоне температур (рис. 1, б) и не может внести искажения в получаемое изображение (вплоть до $T \sim 50000$ К). Это связано с тем, что при визуализации площадь освещаемой поверхности мала, а соответственно и мала часть объема объекта, излучение с которой попадет в активную среду усилителя яркости.

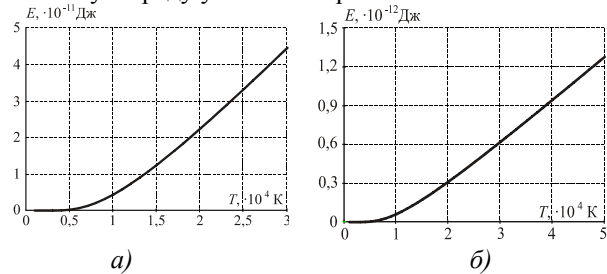


Рис. 3. Зависимости энергии излучения засветки от температуры: а – внешний источник засветки, б – собственная засветка

На данном этапе исследований нами проведено наблюдение объектов с различным уровнем собственной и внешней фоновой засветки: горение бенгальской свечи, свечение вольфрамовой нити накаливания, СВС – собственная засветка; зеленый лист при воздействии лазерным излучением, кожа яблока при воздействии электрокоагулятором, статические объекты (сеточка, дифракционная решетка) сквозь пламя свечи – внешняя засветка. Используя лазерный монитор для наблюдения СВС (температура горения порошковой смеси ~ 2100 К [11]), проведена не только визуализация процесса, но и измерена скорость распространения фронта горения. Работа проводилась совместно с отделом структурной макрокинетики ТНЦ СО РАН.

В качестве задела для дальнейших работ проведена скоростная съемка коронного диффузионного разряда при атмосферном давлении (без использования усилителя яркости). Напряжение на электроде составляло 200 кВ. Эксперименты проводилась в лаборатории оптических излучений ИСЭ СО РАН. Полученные результаты позволили оценить скорость развития разряда и показали необходимость применения лазерного монитора для наблюдения процессов на электроде, поскольку разряд сопровождается сильным свечением в видимом спектральном

диапазоне. Продолжением работ станет наблюдение электрода непосредственно в момент разряда с помощью лазерного монитора, что, возможно, позволит выявить ряд особенностей формирования разряда такого типа.

Итак, лазерные мониторы на основе усилителей яркости на парах меди и бромида меди позволяют визуализировать процессы, в том числе быстропротекающие, экранированные от наблюдателя мощной фоновой засветкой. При использовании таких устройств мы видим сквозь плазму то, что не видно невооруженным глазом. А грандиозный прорыв в области скоростных средств регистрации позволил лазерным мониторам выйти на новый уровень. Диапазон температур объектов наблюдения достаточно широк. Наиболее яркий объект, который наблюдался с помощью лазерного монитора – это эрозионный капиллярный разряд [7], температура плазмы в котором достигает 8600 К. Но согласно оценкам, представленным на рис. 3, с помощью лазерных мониторов возможно наблюдение плазмы или объектов сквозь плазму с температурой порядка 25000 К.

В заключение хотелось бы отметить интересные на наш взгляд перспективы развития лазерных мониторов на основе усилителей яркости на парах металлов, и на парах бромида меди в частности. Визуализация изображений раздельно на зеленой и желтой линиях генерации атома меди может дать дополнительную информацию об объектах исследования, имеющих разные коэффициенты отражения на этих длинах волн. На данный момент не до конца использован частотный потенциал усилителей яркости. Работа на высокой ЧСИ и использование камеры со скоростью регистрации порядка 100000 кадров в секунду существенно увеличит временное разрешение лазерного монитора. Малая мощность зондирующего излучения, падающего на объект от усилителя яркости, (единицы милливатт) делает возможным мониторинг объектов, чувствительных к свету. Применение бистатической схемы лазерного монитора (два синхронизированных усилителя яркости, отдельно для подсветки объекта и усиления отраженного света) позволит увеличить дальность наблюдения, т.е. отдалить элементы оптической схемы от зоны мониторинга. Создание усилителя яркости на парах смесей металлов или галогенидов металлов сделает возможным получение многоцветного изображения объектов.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проекты: РНП.2.1.2/13145, РНП.2.1.2/1425.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оптические системы с усилителями яркости / Под ред. Г.Г. Петраша. – М.: Наука, 1991. (Труды ФИАН, Т. 206) – 152 с.
2. Батенин В.М., Климовский И.И., Селезнева Л.А. Исследование поверхностей электродов угольной дуги во время ее горения // Доклады АН СССР. – 1988. – Т. 303. – № 4. – С. 857–860.
3. Евтушенко Г.С. Шиянов Д.В., Губарев Ф.А. Лазеры на парах металлов с высокими частотами следования импульсов.– Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2010. – 276 с.
4. Евтушенко Г.С., Губарев Ф.А., Суханов В.Б., Шиянов Д.В., Торгаев С.Н., Тригуб М.В. Скоростная визуализация микрообъектов посредством активных сред лазеров на парах металлов в условиях засветки // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 4. – С. 141–146.
5. Абрамов Д.В., Галкин А.Ф., Жарёнова С.В., Климовский И.И., Прокошев В.Г., Шаманская Е.Л. Визуализация с помощью лазерного монитора взаимодействия лазерного излучения с поверхностью стекло - и пироуглерода // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 2. – С. 97–101.
6. Зинченко С.П. Лазерный мониторинг процесса газоразрядного напыления сегнетоэлектрических пленок // Всероссийский симпозиум «Лазеры на парах металлов», Лоо, 20–24 сентября 2010 г.
7. Кузнецов А.П., Бужинский Р.О., Губский К.Л., Савёлов А.С., Саранцев С.А., Терёхин А.Н. Визуализация плазмоиндуцированных процессов проекционной системой с усилителем яркости на основе лазера на парах меди // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 5. С. 463–472.
8. Губарев Ф.А., Федоров В.Ф., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б., Заикин С.С. Лазер на парах бромида меди с частотой следования импульсов 400 кГц // Известия ТПУ. – 2008. – Т. 312. – № 12. – С. 106–107.
9. Андриенко О.С., Губарев Ф.А., Димаки В.А., Иванов А.И., Левицкий М.Е., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Федоров В.Ф., Филонов А.Г., Шиянов Д.В. Лазеры на парах бромида меди нового поколения // Оптика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 22. – № 10. – С. 999–1009.
10. Пасманик Г.А., Земсков К.И., Казарян М.А. и др. Оптические системы с усилителями яркости. – Горький: ИПН АФ СССР, 1988. – 173 с.
11. Юсупов Р.А., Максимов Ю.М., Китлер В.Д. Закономерности технологического горения порошковых систем на минеральной основе при получении пористых композиционных материалов // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т. 38. – № 5. – С. 85–89.

ОСОБЕННОСТИ НОРМИРОВАНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Кулешов В.К., Лимарева А.В., Чухланцева М.М.

ФГУ «Томский ЦСМ», 634012, Россия, г. Томск, ул. Косарева, 17А

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: chuhlantseva@tcsms.tomsk.ru

Важное значение для экономики государства и граждан имеют обеспечение безопасности производства и эксплуатации промышленной продукции и технических сооружений, контроль качества продукции, учёт энергоресурсов и др. Все существующие и строящиеся промышленные объекты в той или иной степени оснащаются средствами автоматизации, как правило, автоматизированными системами управления технологическими процессами (АСУ ТП). Особо следует выделить системы контроля и технической диагностики на промышленных предприятиях, эксплуатирующих сложные технические и технологические комплексы (гидроэлектростанции, предприятия металлургии, нефтехимии, атомной и тепловой энергетики и др.). Непонимание роли и возможности таких систем контроля и технической диагностики приводит к гибели людей, авариям, катастрофам, большим финансовым потерям, загрязнению окружающей среды.

Решение проблем безопасности связано с непрерывным измерением многих диагностических параметров, многомерной обработкой информации, оснащением современными системами контроля, в том числе неразрушающего контроля, информационно-измерительными системами.

Для создания эффективных современных инновационных средств контроля требуется максимально достоверная и объективная измерительная информация о значениях параметров, характеризующих их как продукцию, а также для обеспечения будущей эффективной эксплуатации, снижения рисков при контроле сложных технологических процессов.

Актуальной является задача метрологического обеспечения (МО) измерительных систем (ИС), входящих в АСУ ТП (рис. 1) [1]. В этих системах на функциональном уровне выделяют измерительные каналы (ИК), которые представляют собой совокупность измерительных, связующих, вычислительных, комплексных и вспомогательных компонентов [2].

Нормирование метрологических характеристик (МХ) ИК относится к одному из видов деятельности по метрологическому обеспечению (МО) измерительных систем в соответствии с ГОСТ Р 8.596-2002 [2]. Стандарт указывает также,

что ИС являются разновидностью средств измерений и на них распространяются все общие требования к средствам измерений. Однако практика показывает, что МО ИС АСУ ТП имеет свою специфику [3-4]. На этапе нормирования собственно решается проблема легализации ИС как средства измерений.

Отметим особенности нормирования метрологических характеристик (МХ) ИК АСУ ТП:

1) Особенности развития самих систем контроля и технической диагностики, в том числе:

- а) увеличение масштаба (многофункциональность) ИС:
 - измерение разнородных физических величин ФВ (электрические ФВ, теплотехнические, расход, уровень, содержание веществ в газах и т.д.);
 - применение измерительно-вычислительных комплексов (ИВК) в составе ИС;
 - увеличение групп ИК (сформированных по виду, диапазону измеряемой ФВ, по составу ИК);
 - распределенная многоуровневая структура;
 - модульность исполнения;

б) возрастающая интеллектуализация систем и их компонентов за счёт широко использования вычислительных подсистем и, соответственно, увеличение роли и усложнение программного обеспечения в функционировании ИС;

в) использование резервных подсистем и встроенных средств контроля и само-диагностики «провоцируют» на поиск оптимальных способов регламентации МХ ИК ИС.

2) При нормировании МХ ИС рациональным является подход, при котором всё многообразие измеряемых величин и соответствующих измерительных компонентов разделено на группы. При построении структуры ИС для объединения в группы можно использовать разные признаки: измеряемая физическая величина, ее диапазон, тип измерительных компонентов, состав измерительного канала и т.д. Данный вопрос решается в результате анализа специфических особенностей и назначения ИС. Для ИС, предназначенной для контроля параметров сложного технологического объекта (например, металлургического предприятия), оптимальным является группировка ИК по виду и диапазону измеряемой физической величины (рис.2).

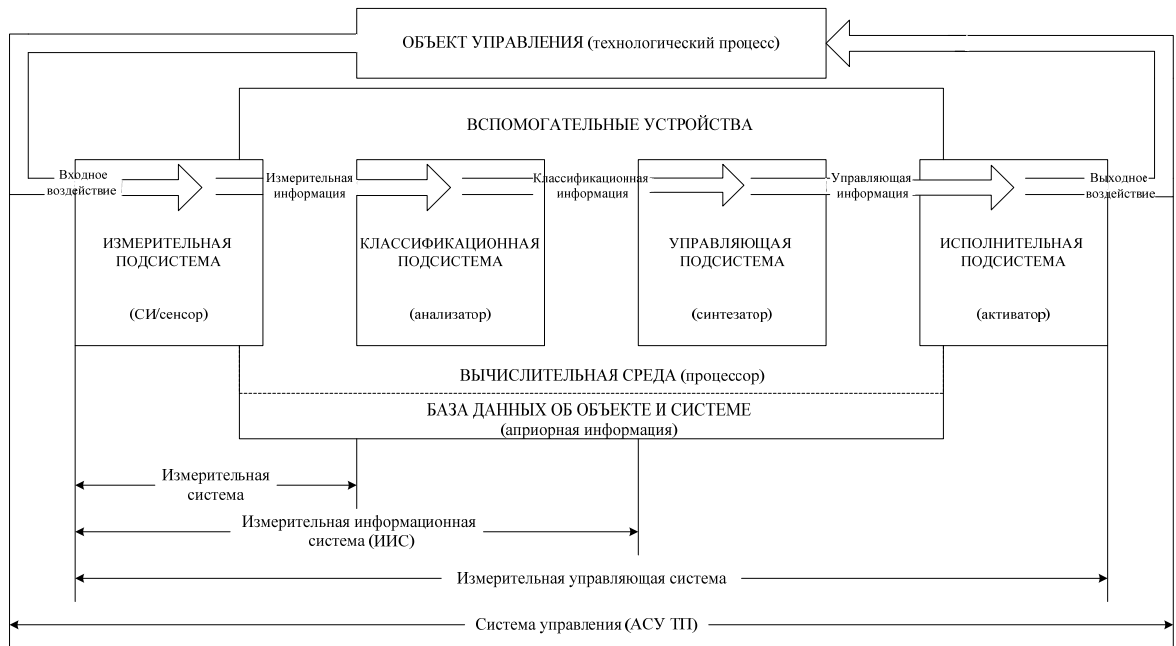


Рис. 1. Обобщённая структура ИИС и АСУ ТП

3) Трудности вызывает поиск и выбор оптимального способа регламентации метрологических характеристик ИС. В соответствии с МИ 2439 «ГСИ. МХ ИС. Номенклатура. Принципы регламентации, определения и контроля» для ИС регламентируются МХ ИК в целом, МХ входящих в них компонентов (или их некоторой совокупности – комплексных компонентов), в виде: нормируемых значений (норм), экспериментально или (и) расчётно определяемых значений. Актуальность проблемы обусловлена особенностями создания и эксплуатации ИС, не позволяющими зачастую осуществить комплектную поверку (калибровку) канала.

На практике, обычно, применяется метод двухкомпонентной декомпозиции ИС, которая позволяет охватить ИК со структурой практически любой сложности за счёт последовательного применения метода расчёта двухкомпонентного канала. Если канал состоит из n ($n > 2$) компонентов с известными МХ, то в принципе можно рассчитать результирующую МХ. Однако неизбежные допущения расчётного метода снижают достоверность результатов расчёта.

4) Обычно при проектировании ИС АСУ ТП выбираются первичные преобразователи (ПП) с заведомо широким диапазоном измеряемых величин, для которых нормированы границы приведённой погрешности измерений. При оценивании же суммарной погрешности ИК приходится делать выбор – для каких значений из диапазона нормировать относительную погрешность измерений, чтобы она не превышала разумную была адекватна измерительной задаче. В этом случае целесообразно выделить (назначить), так называемый, рабочий диапазон

(нормальный режим – нормально протекающий технологический режим).

5) Как правило, системы контроля и диагностики АСУ ТП содержат большое количество ИК с труднодоступными ПП (например, «вмурованные» в доменную печь термопары). В этом случае, невозможно осуществить бездемонтажный контроль МХ ПП, а также поверку. Необходима разработка новых подходов к обеспечению метрологической надёжности подобных СИ.

6) ИК ИС АСУ ТП зачастую комплектуются средствами измерений утверждённых типов, но при этом включают блоки от разных модификаций, хотя и согласующиеся по техническим характеристикам. Трудность составляет поиск достоверных данных о нормированных МХ таких блоков. Целесообразно пользоваться базами данных Федерального информационного фонда в области обеспечения единства измерений Росстандарта (госреестра СИ утверждённых типов).

В настоящее время на базе Государственного центра испытаний средств измерений (ГЦИ СИ) ФГУ «Томский ЦСМ» и Центра метрологии ТПУ проводятся работы по утверждению типа более 20 ИС, функционирующих в составе АСУ ТП металлургических комбинатов Кузбасса. В ходе работ были выявлены указанные особенности нормирования МХ ИК ИС, а также решаются возникшие проблемы.

Для решения проблем нормирования МХ ИК ИС АСУ ТП по мнению авторов необходимо продолжить исследования в области:

- разработки оптимальных способов регламентации и контроля МХ СИ, работающих в широком диапазоне изменения влияющих величин

Таблица 1

Метрологические характеристики ИК ИС «Лес сортового проката. Назревающие печи участка дельсовых скреплений»							
№ ИК	Наименование ИК	Диапазон измерений физической величины, ед. измерения	Рабочий диапазон (нормальный режим)	Состав измерительного канала	Метрологические характеристики СИ ИК	Пределы допускаемой основной погрешности ИК	Пределы допускаемой погрешности ИК в рабочих условиях
				Наименование СИ ИК	диапазон измерений		
1	Температура в верхней зоне, печь 1	от 0 до 1300 °С	(860-880) °С (800-930) °С	Преобразователь термоэлектрический ТХА-0192-Г	от 333 до 1000 °С	$\pm 0,0075 t $	
2	Температура в верхней зоне, печь 2	от 0 до 1300 °С	(800-930) °С (40-110) °С	Преобразователь нормирующий микропроцессорный 2000НМ	К	$\pm 0,5\%$ от нормирующего значения	
3	Температура в нижней зоне, печь 1	от 0 до 1300 °С	(40-110) °С (50-80) °С	Регистратор многоканальный технологический РМТ 49	мА		
4	Температура в нижней зоне, печь 2	от 0 до 1300 °С		Модуль ввода аналоговых сигналов SM331 6ES7 331-7NF00-0AB0 контроллера программируемого SIMATIC S7-300	8 входов $\pm 5/\pm 10$ В 1-5 В 0-10 В 0/4-20 мА ± 20 мА Выход: 15 бит + знак	$\gamma = \pm 0,05\%$	

Рис. 2. Фрагмент таблицы по нормированию МХ ИК по измеряемой физической величине

- обеспечения метрологической надёжности сложных технических систем контроля и диагностики, входящих в АСУ ТП, в том числе относящихся к промышленно опасным объектам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грановский В.А. Системная метрология: метрологические системы и метрология систем.- СПб., 1999.-360 с.

2. ГОСТ Р 8.596-2002 ГСИ. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения.

3. Чухланцева М.М., Артюхина Л.В., Уварова В.А. Проблемы нормирования технических характеристик в проектно-компонуемых измерительных системах. - Труды 26-й Международной научно-практической конференции. 20-22 ноября 2007 г./ Под ред. А.Г. Лупея.- СПб.: Борей-Арт, 2007.- 437с.: ил. - С. 40-45.

4. МИ 2439-97 ГСИ. МХ ИС. Номенклатура. Принципы регламентации, определения и контроля.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНТЕГРИРОВАННЫЕ СТРУКТУРНО-ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ В ТЕХНИЧЕСКОЙ И МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ, МОНИТОРИНГЕ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ ГОРОДОВ

Сырымкин В. И., Буреев А. Ш., Глушков Г. С., Горбачев С.В., Жданов Д. С.
Томский государственный университет, г. Томск, 634050

В медицинской и технической диагностике все чаще используются различные интеллектуальные автоматизированные системы, имеющие различное техническое устройство, назначение и, как обязательная составляющая, специализированное программное обеспечение (ПО), позволяющее мгновенно обрабатывать получаемую информацию об исследуемом объекте. Многие системы являются структурно – перестраиваемыми, т. е. нацеленными на решения большого количества задач за более короткое время. Это позволяет создать более быстродействующие алгоритмы работы ПО, увеличить область применимости программно – аппаратных комплексов.

В данном докладе будут освещены, разработанные авторским коллективом:

- 1) медицинские диагностические системы;
- 2) интеллектуальная система обеспечения безопасности городов;
- 3) система для технической диагностики материалов;
- 4) система мониторинга природных ресурсов.

В настоящее время ввиду все возрастающей криминогенной ситуации в городах как Российской Федерации, так и мира встала задача разработки единой системы обеспечения безопасности городов. Главной задачей при построении такой системы является контроль условного объекта (на проникновение) без участия человека. Интеллектуальная система способна самостоятельно принимать решения по заданному алгоритму.

Неотъемлемой частью интеллектуальной системы является программное обеспечение, позволяющее максимально эффективно использовать ресурсы аппаратной части, а так же обеспечить своевременное реагирование на потенциальную угрозу и ведение журнала, отражающего работу системы. Организацию взаимодействия Интеллектуальной системы с человеком обеспечивает интерфейс программы, обладающий такими немаловажными характеристиками как простота и удобство использования.

Несмотря на большое разнообразие аналоговых программных средств, данная область разработки не стоит на месте и активно развивается. Поэтому разработка «Интеллектуальной интегрированной системы охраны» очень актуальна и своевременна.

Технология распознавания в «Интеллектуальной интегрированной системы охраны» основана на сравнении изображений по принципу RGB (красный, зеленый, синий), т.е. сравнение оттенков текущего изображения с эталоном. За счет автоматизированного процесса сравнения полностью исключается влияние человеческого фактора, что обеспечивает быстродействие работы охранной системы и минимизирует возможные ошибки.

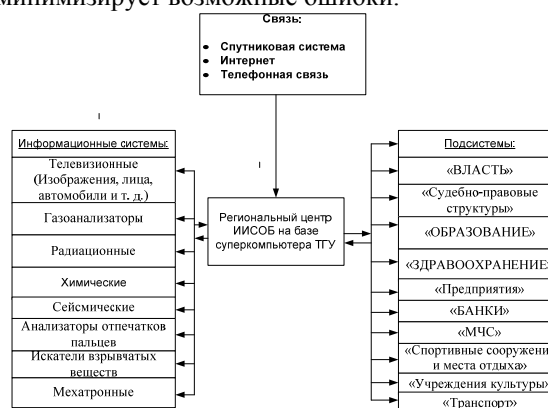


Рис. 1. Блок – схема интеллектуальной интегрированной системы обеспечения безопасности городов

Интеллектуальная интегрированная система охраны безопасности городов (ИИСОБ) обеспечивает проведение сбора и анализа информации полученной с датчиков и на основании этих параметров, сопоставляя их с данными базы данных, формирует интегральную оценку объекта. На рисунке 1 представлена блок – схема, иллюстрирующая структуру ИИСОБ.

Новизна ИИСОБ заключается в использовании следующих подходов:

- 1) новый принцип обработки информации в интегрированных интеллектуальных охранных системах, использующих несколько информационных каналов;
- 2) интеграция таких средств сбора и анализа информации, как телевизионные датчики различных размерностей и цветностей, газоанализатор и анализаторы звука (голоса);
- 3) высоконадежный и быстродействующий способ распознавания личности человека путем анализа интегральной информации основанной на модифицированных корреляционных, Фурье- и вейвлет алгоритмах, использующих структурные и цветные признаки.

Принцип действия системы основан на сборе и анализе информации, полученной с датчиков и на основании этих параметров, сопоставляя их с данными базы знаний, формирование интегральной оценки состояния охраняемой зоны.

Достоинствами разрабатываемой системы являются:

1) высокая надежность и быстродействие, обусловленные наиболее оптимально подобранным алгоритмом работы системы. Что позволяет быстро и своевременно реагировать на возникновение потенциальных угроз;

2) полная автоматизация распознавания образов, что позволяет полностью исключить влияние человеческого фактора на результаты работы охранной системы;

3) максимально эффективное использование ресурсов аппаратной части, что позволяет оптимизировать затраты на использование программы;

4) удобный интерфейс, позволяющий организовать оптимальное взаимодействие между составляющими аппаратной и программной частями системы, а так же обеспечивающее простоту и удобство в использовании [1-3].

В настоящее время активно развивается рынок неинвазивных диагностических систем, позволяющих без вмешательства в организм человека поставить диагноз заболевания. Был создан и разработан ряд устройств, позволяющих проводить быструю неинвазивную диагностику состояния таких органов и систем как:

- 1) поверхности кожи (дерматология);
- 2) поверхности шейки матки (гинекология);
- 3) ушной и ротовой полости (отоларингология);
- 4) состояния сердечно - сосудистой системы по капиллярам эпонихия пальцев рук человека.

Устройства представляют собой программно – аппаратные комплексы, позволяющие считывать цветные телевизионные изображения поверхностей исследуемых органов и, с помощью специализированного программного обеспечения, хранящие, передающие и обрабатывающие полученные изображения. В результате обработки снимков поверхностей исследуемых органов автоматизированная система, представляющая собой программную часть каждого из устройств, выдает заключение о наличии, либо же отсутствии патологии исследуемых органов и систем. Функциональная схема разработанных неинвазивных диагностических систем представлена на рисунке 2.

Как видно из рис. 2 аппаратная часть неинвазивных диагностических систем состоит из блока считывания изображения (содержит в своем составе цифровую видеокамеру, блок подсветки считываемой области, регулятор освещения) и блока управления питанием каждого из устройств. Специализированное программное обеспечение

(ПО) неинвазивных диагностических систем обеспечивает прием цветных телевизионных изображений с аппаратной части системы в базу данных ПО, которая хранится на персональном компьютере в зашифрованном виде. Обработка цветных телевизионных изображений происходит на основе быстродействующих прецизионных алгоритмов распознавания патологий органов человека.

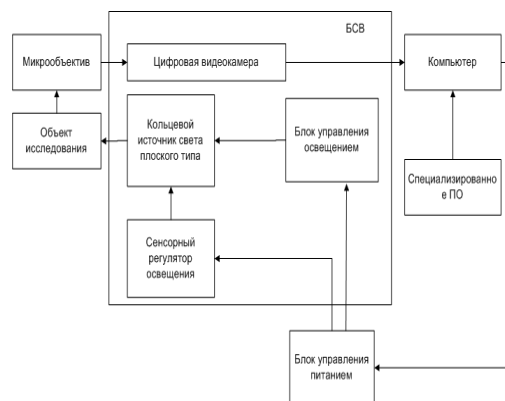


Рис. 2. Функциональная схема неинвазивных диагностических систем

Программное обеспечение, входящее в состав неинвазивных оптико-телевизионных диагностических систем, разработанных авторским коллективом, помимо распознавания патологий исследуемых органов человека позволяет также:

- 1) вести электронные истории болезни пациентов, обратившихся на прием;
- 2) формировать электронную базу данных получаемых во время исследований изображений;
- 3) генерировать отчетную информацию, необходимую для работы врача-специалиста;
- 4) интегрировать неинвазивные диагностические системы в Российские и мировые телемедицинские сети [4].

Помимо неинвазивных диагностических систем всем учреждениям здравоохранения необходима терапевтическая система, позволяющая контролировать процесс инфузии (введения) жидкого лекарственного средства в организм пациента в стационарах медицинских учреждений. В настоящее время существуют лишь системы, позволяющие задавать объем вводимого лекарственного препарата и время его введения, но не следящие за ходом самой процедуры инфузии. Была разработана интеллектуальная телекоммуникационная автоматическая система контроля состояния капельниц (ИТАСКСК), выполняющая следующие функции:

- 1) контроль процедуры инфузии: передача информации на пульт управления и пейджер медсестры;
- 2) фиксация номенклатуры вводимого лекарственного средства;

- 3) считывание штрих-кода вводимого лекарственного препарата;
- 4) контроль скорости подачи лекарственного средства;
- 5) контроль объема введенного раствора;
- 6) объективный контроль состояния пациента.

Все неинвазивные диагностические системы и ИТАСКСК интегрируются в единую телемедицинскую систему, разработанную авторским коллективом, которая применяется для:

1. диагностики и консультации на расстоянии, прежде всего между врачом-консультантом и другим медицинским работником;
2. проведения лечебных мероприятий на расстоянии (психотерапия, фрагменты хирургических вмешательств с помощью телеманипуляторов);
3. дистанционного обучения (студенты, аспиранты, переподготовка в реальном времени) [4].

Системы мониторинга природных ресурсов позволяют спрогнозировать наиболее вероятные точки залегания природных ресурсов, оценить их потенциал и спрогнозировать возможные направления поиска природных ресурсов.

Физические поля, наблюдаемые над месторождениями нефти и газа, видоизменяются в зависимости от расположения залежей и интенсивности процессов преобразования надпродуктивной толщи пород под воздействием миграции углеводородов. Они позволяют создать многомерное признаковое пространство, которое можно использовать как фактическую основу для прогнозирования контура нефтегазоносности в рамках задачи комплексной интерпретации – построения новых объектов на карте, однородных в смысле некоторого критерия или группы критериев. В этом смысле задача сводится к неформализованной проблеме классификации, причем в соответствии с актами и каротажными оцифрованными диаграммами испытаний разведочных скважин в простейшем случае могут использоваться два класса (I – "продуктивные скважины", II – "пустые"), а в более сложных задачах число классов может быть увеличено по любому признаку, например "водно-нефтяной контакт".

Системы мониторинга природных ресурсов строятся на основе самообучаемых нейронных сетей.

Большое распространение также получили интеллектуальные системы контроля состояния материалов, совмещающие внешний (поверхностный) и внутренний (акустический) анализ материала. На основе алгоритма акустического анализа был разработан прибор, осуществляющий сбор информации об исследуемом наноматериале и передачу ее на персональный компьютер для дальнейшей ее обработки.

Прибор позволяет провести как экспресс-анализ, так и подробное обследование объектов с определением и записью акустических характеристик, что дает возможность обнаружить наличие и определить характер дефектов (трещины, дефекты плавки и другие дефекты в материале обследуемого объекта).

Работа прибора основана на принципе приема, регистрации и анализа акустических сигналов, возникающих в объекте обследования в результате импульсного воздействия источника волн напряжений. Возникающая волна напряжений, проходя по объекту, изменяет акустические характеристики при наличии дефектов. Акустические сигналы снимаются пьезокерамическим датчиком, преобразуются в электрические колебания и поступают в прибор для обработки.

Обработка результатов проводится с помощью специальной компьютерной программы. При повторных обследованиях может быть дан прогноз развития дефектов.

При обработке цифровых сигналов используются алгоритмы цифровой фильтрации и спектрального анализа (вычисление дискретного и быстрого преобразования Фурье – ДПФ и БПФ), алгоритмы корреляционного анализа.

В специализированном ПО реализованы возможности:

- отображения сигнала в произвольном масштабе;
- определение спектра сигнала;
- определение функции взаимной корреляции;
- оперирования произвольным количеством сигналов;
- наложение полосового фильтра [4-5].

ЛИТЕРАТУРА

1. В.И. Сырякин, В.С. Титов, Ю.Г. Якушенков Системы технического зрения // Справочник. – Томск: МГП «РАСКО», 1992.– 367 с.: ил.
2. Герман Кругль Профессиональное видеонаблюдение. Практика и технологии аналогового и цифрового CCTV. – «Секьюрити Фокус», 2010.–672 с.
3. В.Н. Козлов Элементы математической теории зрительного восприятия. – М.: МГУ, 2001. – 122с.
4. Бубенчиков М. А., Газилова Е. Э., Гафуров А. О., Глушков Г. С., Жданов Д. С., Саньков Д. В., Сырякин В. И., Шидловский С. В., Юрченко А. В. «Современные методы исследования материалов и нанотехнологий, Учебное пособие (лабораторный практикум), 366 стр.
5. Кориков А.М., Сырякин В.И., Титов В.С. Корреляционные зрительные системы роботов. - Томск: Радио и Связь. Том. отд-ние, 1990. -264с.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОНИТОРИНГ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ТАШТАГОЛЬСКОМ ЖЕЛЕЗОРУДНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

*Беспалько А.А., *Яворович Л.В., *Федотов П.И., **Штирц В.А.

* Томский политехнический университет»

**Таштагольский филиал ОАО «ЕВРАЗРУДА»

В настоящее время, наряду с измерениями микросейсм, наиболее перспективным для контроля изменений напряженно-деформированного состояния (НДС) горного массива и краткосрочного прогноза геодинамических событий в шахтном поле рудников является метод, основанный на механоэлектрических преобразованиях в горных породах и других гетерогенных материалах. Сотрудники Проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников Томского политехнического университета (ПНИЛ ЭДиП ТПУ) на протяжении ряда лет ведут работы по созданию аппаратно-программных комплексов для надежной регистрации электромагнитных сигналов (ЭМС), возникающих в горных породах при изменении НДС, а также по выявлению прогностических признаков образования деструктивных зон и развития геодинамических явлений в горном массиве по параметрам ЭМС и характеристикам электромагнитной эмиссии [1]. Исследования проводятся в шахтном поле Таштагольского рудника на глубинах до 800 м. Это позволяет исключить влияние атмосферного электричества на измеряемые параметры ЭМС. Выбор Таштагольского рудника в качестве полигона для таких исследований обусловлен взрывной технологией обработки рудного тела с закладкой взрывчатых веществ до 300 тонн. Возбуждение горного массива рудника взрывами, проведение очистных работ, прокладка штреков и ортов сопровождается геодинамическими событиями разного класса до энергий в несколько мегаджоулей. До взрывов, во время их проведения и в период релаксации горного массива в относительно устойчивое состояние измерения велись автономными аналого-цифровыми приборами РЭМС-1 [2], обеспечивающими запись

во встроенную память выбранных параметров электромагнитных и акустических сигналов (АС). Регистратор разработан в ПНИЛ ЭДиП ТПУ и изготовлен совместно с Институтом оптического мониторинга СО РАН. Запись амплитуд электромагнитных сигналов по электрической или магнитной составляющим осуществляется с усреднением за 1 или 5 секунд. Усредненные амплитуды ЭМС является одной из характеристик электромагнитной эмиссии (ЭМЭ) горных пород. Вариации амплитуды ЭМЭ во времени пропорциональны напряженности электрического поля, изменяющейся в процессе прохождения механоэлектрических преобразований в породном массиве. Электромагнитные сигналы регистрировались по пяти каналам: в широкой полосе частот от 1 до 100 кГц; в выделенных полосах с добротностью в пределах 4÷7 с центральными частотами 2, 15 и 100 кГц. В полосе частот 1÷30 кГц фиксировалась интенсивность ЭМС. Интенсивность ЭМС пропорциональна среднему значению потока напряженности электромагнитного поля в единицу времени. По шестому каналу регистрировали усредненные значения амплитуд АС или амплитуды акустической эмиссии (АЭ) горных пород, которые отображают факт возникновения и прохождения геодинамического события и пропорциональны его энергии. Время бесперебойной работы в шахтных условиях рудника на встроенных аккумуляторах составляет 36 часов, а с дополнительным внешним аккумулятором емкостью 9 А·ч время работы возрастает до 170 часов. На рис.1 приведена блок-схема регистратора РЭМС-1. В блоке сбора информации (БИС): X1 и X2 - разъемы для подключения емкостных приемников ДЕП₁ и ДЕП₂, X3 и X4 - разъемы для подключения индукционных приемников ДИП₁ и ДИП₂, X5 - разъем для подключения антенны (АП), X6 и X7 - разъемы для подключения блока данных (БДА), блока питания (БП) и персонального компьютера (ПК).

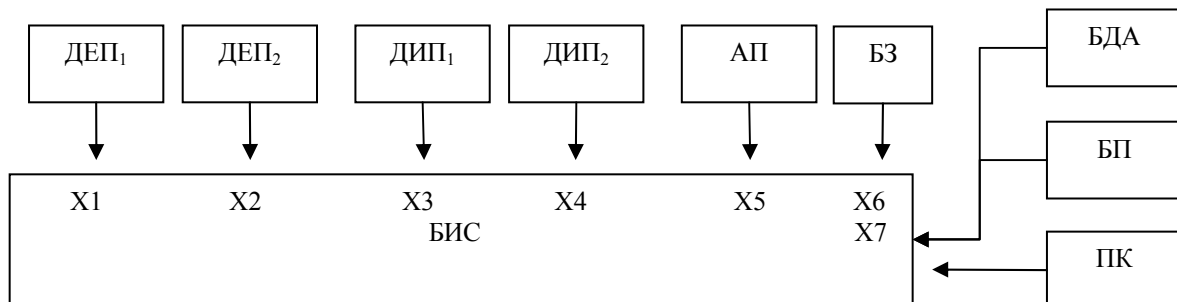


Рис.1. Блок-схема регистратора РЭМС-1

X5 – разъем для подключения пьезоэлектрического приемника акустических сигналов АП, X6 – разъем для осуществления подключения удаленного запуска регистратора, X7 – разъем для поочередного подключения дополнительного источника питания БДА, зарядного устройства встроенных в регистратор аккумуляторов, персонального компьютера ПК. Аналоговые усилители БИС имеют дифференциальный вход. Для анализа связи параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ с изменениями НДС и геодинамической обстановкой использовали, наряду с измерениями амплитуды АЭ, сейсмические данные Таштагольской сейсмостанции, а также характеристики сдвижения горного массива в шахтном поле рудника, измеряемого сотрудниками ВостНИГРИ (г. Новокузнецк).

Для выявления участков массивов шахтного поля с наибольшей электромагнитной эмиссионной способностью проведены наблюдения изменений интенсивности ЭМЭ. Использовался метод профилирования в орте 2

горизонта (-210) м. Следует отметить, что отметка поверхности (+450) м. Таким образом, горизонт, на котором проводились наблюдения находится на глубине 660 м. В интервале частот $1 \div 100$ кГц измерялась интенсивность импульсного потока ЭМЭ. Данные измерений электромагнитной эмиссии с усреднением 1 секунда записывались в память регистратора с последующим считыванием этих данных на персональный компьютер для дальнейшей обработки. Время измерения ЭМЭ при прохождении каждого пикета составляла 5 минут. Расстояние между пикетами в орте составляло 1,5 м. Измерения проводили от участка залегания магнетитовой руды, имеющей контакт с дайкой (трещиной), заполненной диоритами. С другой стороны дайки целиком сложен скарнами. На рис. 2а приведены изменения среднего значения интенсивности потока ЭМЭ по магнитной составляющей электромагнитного поля при разное датчиков на 3 м. В эксперименте использовали пассивный метод регистрации, заключающийся в отсутствии внешнего

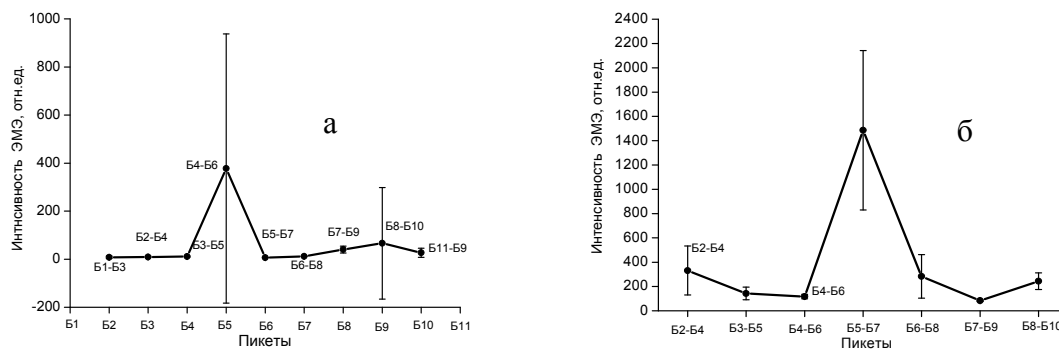


Рис.2. Изменение среднего значения ЭМЭ, регистрируемых с использованием датчиков ДЕП (а) и ДИП (б), разнесенных на 3 м, при профилировании орта 2, горизонта (-210) м

ударного воздействия на участке измерений и вблизи него. Направление профилирования от пикета Б1, который находится в массиве сложенном рудой, до пикета Б11, расположенного в скарновом целике. Разметка профиля на пикеты была проведена таким образом, что контакт руды с дайкой оказался в районе пикета Б6, а контакт дайки со скарнами - в районе пикета Б8. С учетом этой разметки на рис.2а отображены изменения интенсивности потока ЭМЭ при пересечении места выхода дайки в орт, причем при измерении в самой дайке наблюдали увеличение разброса значений. Большим разбросом значений интенсивности ЭМЭ выделился также район пикетов Б8-Б10. Изучение геологической карты района работ показало, что в этом месте орт пересекает тектоническое нарушение в виде трещины, что и способствовало увеличению интенсивности потока ЭМЭ по магнитной составляющей. Измерение интенсивности ЭМЭ по электрической составляющей электромагнитного

поля при профилировании орта 2 горизонта (-210) м приведено на рис.2б. При прохождении пикетов, расположенных в руде, значения интенсивности ЭМЭ низкие и составляли в среднем за 5 минут 30 импульсов в секунду. Это объясняется достаточно высокой проводимостью магнетитовой руды. При подходе к дайке в районе пикета Б6 интенсивность потока ЭМЭ резко возросла и достигала значения до 2500 импульсов в секунду. При дальнейшем продвижении по профилю высокое значение интенсивности сохранялось до пикетов Б7-Б9, а затем наблюдали резкий спад интенсивности до средних значений 500 импульсов в секунду. Значительный разброс интенсивности ЭМЭ по электрической составляющей выявлен также в районе пикетов Б6-Б8, что свидетельствует о нестабильной электромагнитной эмиссии массива в месте проводимых измерений, которое определяется пересекающей массив дайкой. Результаты измерений интенсивности импульсного потока

электромагнитных сигналов ЭМЭ по пикетам позволили сделать вывод о преимущественной электромагнитной эмиссионной способности контактов горных пород в шахтном поле. Это позволит использовать разрабатываемый метод регистрации электромагнитной активности в режиме профилирования для определения скрытых структурных нарушений в горных выработках. С другой стороны повышенная эмиссионная способность протяженных контактов горных пород вероятно обусловлена также и направленным распространением ЭМС вдоль этих сопряжений, примыкающих к зонам тектонических нарушений. В свою очередь нарушения являются концентраторами напряжений и провоцируют геодинамические явления. Таким образом, по изменениям параметров ЭМЭ на контактах горных пород появляется возможность оценивать НДС и динамику массива во времени. С этой целью целесообразно вести мониторинг изменения напряженно-деформированного состояния массивов на дайках и контактах пород, имеющих выход на разломы, зоны смещения и смятия, а также в места проведения технологических взрывов.

На Таштагольском железорудном месторождении массовые технологические взрывы с закладкой ВВ от 70 до 300 тонн производятся 4-6 раз в год на горизонтах от (-70) до (-350). После технологических взрывов происходят геодинамические явления различного энергетического класса до 10^9 Дж, в том числе «горные удары». Обилие геодинамических процессов и явлений после таких воздействий позволяет набирать статистические данные для разрабатываемого в ПНИЛ ЭДиП ТПУ метода мониторинга и краткосрочного прогноза геодинамических событий. Аналого-цифровой регистратор РЭМС-1 обеспечивает проведение

измерений ЭМЭ и АЭ до взрыва, во время его проведения и в период релаксации горного массива после взрыва. В качестве примера на рис.3 приведен график изменения интенсивности ЭМЭ за период 22 часов с прохождением «горного удара» (ГУ) в течение десятков секунд после проведения технологического взрыва (ТВ). Технологический взрыв блока №11 между горизонтами (-210) и (-280) проводился 12 октября 2003 года. Было взорвано 285 тонн ВВ. По наблюдениям сейсмостанции г. Таштагол энергия взрыва соответствовала величине $3.51 \cdot 10^8$ Дж. Два регистратора РЭМС-1 были установлены в орту 8 горизонта -280 м. В этом месте массив горных пород сложен магнетитовой рудой. Запись электрической составляющей электромагнитного поля осуществляли одним регистратором с использованием двух емкостных датчиков, подключенных по дифференциальной схеме. Магнитную составляющую электромагнитного поля регистрировали вторым прибором посредством двух индукционных датчиков, также присоединенных по дифференциальной схеме. Расстояние между парой датчиков составляло 5 м. Все датчики были установлены около южного борта выработки в направлении к взрываемому блоку. Два датчика ДЕП и ДИП находились в 1 м от дайкообразного тела. В качестве примера на рис.3 приведен график изменения интенсивности ЭМЭ за период 22 часов с прохождением «горного удара» (ГУ) в течение десятков секунд после проведения технологического взрыва (ТВ). Технологический взрыв блока №11 между горизонтами (-210) и (-280) проводился 12 октября 2003 года. Было взорвано 285 тонн ВВ. По наблюдениям сейсмостанции г. Таштагол энергия взрыва соответствовала величине $3.51 \cdot 10^8$ Дж. Через 50 секунд после технологического взрыва произошел горный удар с энергией $1.1 \cdot 10^8$ Дж. Эпицентр горного удара находился в 50 м на Ю-3

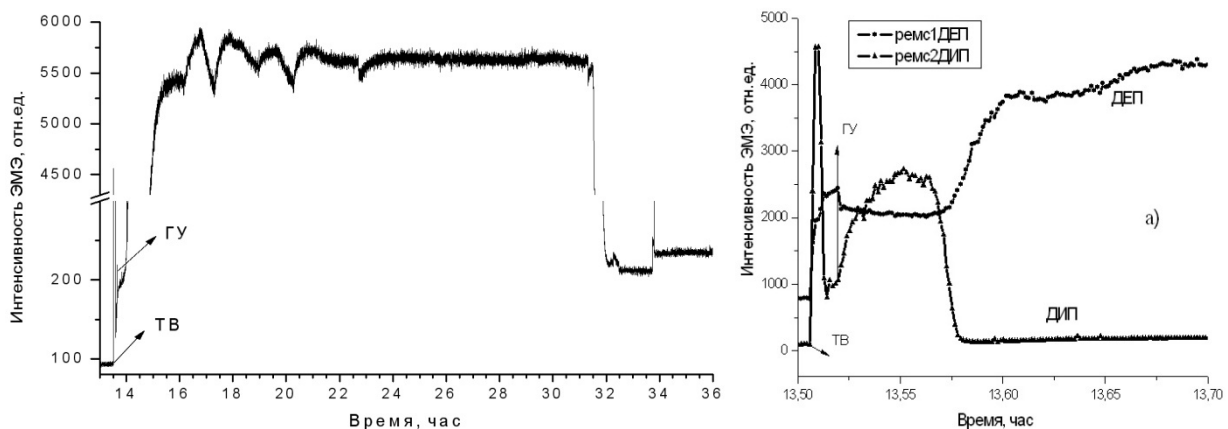


Рис.3. Усредненные значения интенсивности ЭМЭ при проведении технологического взрыва 12 октября 2003 года блока №11 между горизонтами (-210) и (-280) за временной интервал 22 часа после технологического взрыва. На рис.3а приведен развернутый ход интенсивности ЭМЭ в период взрыва и «горного удара», отмеченные стрелками ТВ и ГУ, соответственно

от места взрыва на глубине (-240) м. На рис.3 виден ГУ и релаксационный период после его прохождения в течение 4 минут. Затем массив перешел в возбужденное состояние, которое продолжалось около 17 часов, с возвратом на новый уровень состояния. Такое возбуждение характерно для сдвижения больших масс породы по активным разломам горного массива. Измерения ЭМЭ комплексировались с данными акустических измерений АЭ с помощью РЭМС-1 и с сейсмическими данными, полученными с Таштагольской сейсмостанции. В результате было выявлено 3 основных временных процесса: взрывное 15 секундное возбуждение горного массива и прохождение «горного удара» после 50 секундной задержки; 4 минутная релаксация горного массива после завершения «горного удара»; 17 часовое возбуждение массива с возвратом в относительно устойчивое состояние. На рис.3а приведен развернутый вид интенсивности ЭМЭ, полученной в течении 20 минут двумя регистраторами РЭМС-1 с использованием емкостных датчиков ДЕП и индукционных ДИП. Ход зависимостей

интенсивности ЭМЭ от времени по электрической и магнитной составляющим различен и обусловлен структурой горных пород составляющих массив.

На рис.4 приведены изменения интенсивности ЭМЭ и АЭ от времени при технологическом взрыве, аналогичного по массе ВВ (297 тонн) взрыву 12 октября 2003 года, в шестом блоке между горизонтами (-140) и (-210) шахты Таштагольского рудника. Регистратор располагали возле северного борта орта 7 горизонта (-210). Горный массив здесь сложен сланцами и скарнами. В качестве приемников электромагнитных сигналов использовались индукционные датчики, установленные в скважины, пробуренные в борту выработки на высоте 2 м от ее основания. Расстояние между приемными датчиками составляло 5 м. Приемником акустических сигналов служил широкополосный пьезопреобразователь специальной конструкции, который вбивался в борт проходки рядом с индукционными датчиками. После проведения технологического взрыва прохождение «горного удара»

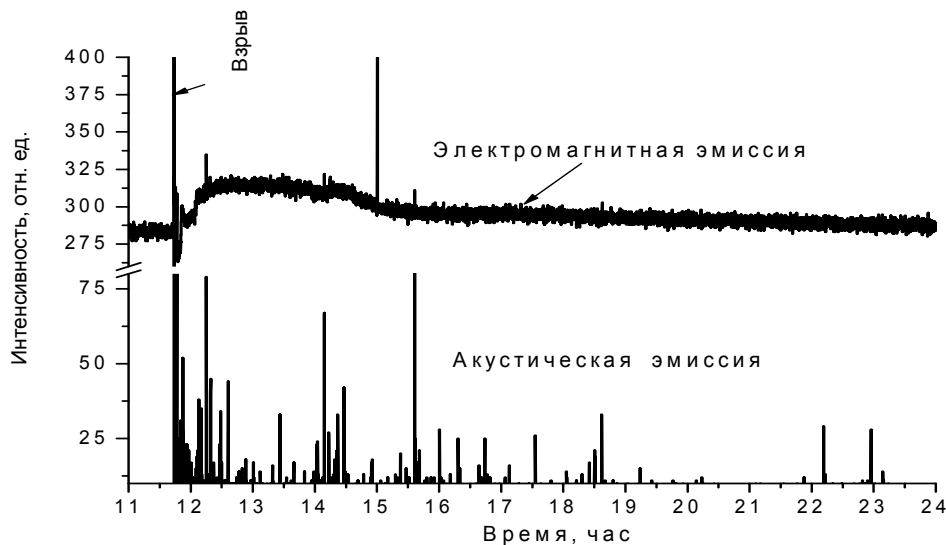


Рис. 4. Электромагнитная и акустическая эмиссии массива горных пород Таштагольского рудника до технологического взрыва, во время и после него в блоке №6 между горизонтами – 140 и – 210 м

не наблюдали. Ход изменений ЭМЭ показывает в явном виде этапы релаксации горного массива после таких мощных взрывных возмущений. Причем на наибольшее возбужденное состояние массива приходится максимум геодинамических событий разного энергетического класса. Это видно по АЭ, приведенной на рис.4. и по сейсмическим данным Таштагольской сейсмостанции. Следует отметить, что при развертывании полученных данных для более детального просмотра, видна тонкая структура ЭМЭ, необходимая и полезная для разработки

метода мониторинга и прогноза разрушительных геодинамических событий в шахтных условиях.

На рис.5 приведен фрагмент записи ЭМЭ до технологического взрыва, во время его проведения и в период переменной разгрузки массива. Массовый технологический взрыв массой 200 тонн ВВ проводился 5 июня 2011 года. Регистраторы были установлены в орте 2 горизонта (-210)м в 57 м на юг от взрываемого блока 4-5. Индукционные датчики устанавливали на контактах дайке, которая описана выше при прохождении профилирования по пикетам. Дайка

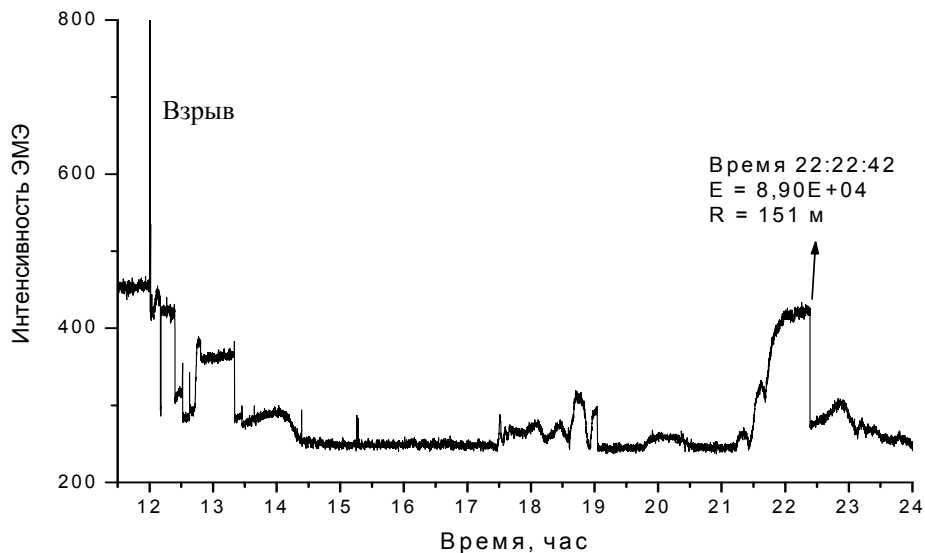


Рис. 5. Изменение интенсивности электромагнитной эмиссии до массового технологического взрыва, проведенного 5 июня 2011 года, между горизонтами (-140) – (-210) в блоке 4-5, во время его проведения, в период релаксации горного массива. Стрелкой отмечено одно из геодинамических событий, прошедшее в виде толчка

простирается в направлении взрываемого блока. На рис.5 видно, что до взрыва интенсивность ЭМЭ находится на уровне 450 отсчетов. После проведения массового технологического взрыва горный массив стал разгружаться, и интенсивность ЭМЭ снизилась в два раза. Причем разгрузка протекала поэтапно с увеличением и уменьшением НДС массива. После разгрузки релаксационные процессы в горном массиве продолжились в виде увеличения НДС массива и возвратом этого состояния в исходное после прохождения толчков различного класса. Такие спады в результате толчков наблюдали и в первые 2.5 часа после взрыва. Геодинамические события отмечались при регистрации АЭ и по данным Таштагольской сейсмостанции. Особенно наглядным примером мониторинга изменения НДС по характеристикам ЭМЭ является толчок, произошедший в горном массиве в 22 часа 22.42 минуты в 151 м от места расположения регистратора. Здесь наблюдали возрастание интенсивности ЭМЭ до значений, предшествующих взрыву, с последующим резким спадом после разгрузки массива в виде толчка четвертого класса по шкале Рихтера. Причем весь процесс продолжался более одного часа. Это указывает на то, что мониторинг подготовки и развития геодинамических событий при правильной установке регистрирующей аппаратуры типа РЭМС-1 возможно уже в настоящее время.

Таким образом, проведенные исследования показали, что мониторинг изменения НДС массивов целесообразно вести на дайках и контактах пород, имеющих выход на разломы, в зоны смещения и смятия, а также в места проведения технологических взрывов. Изменения

напряженно-деформированного состояния породного массива влекут за собой и изменения характеристик электромагнитной эмиссии, возникающей вследствие механоэлектрических преобразований в горных породах. В свою очередь, нарастание или уменьшение интенсивности и амплитуды электромагнитной эмиссии горных пород в натуральных условиях шахт позволяют выявлять этапы подготовки и проявления геодинамических событий, определять характер перераспределения напряженно-деформированного состояния массива. Разработанный в ПНИЛ ЭДиП ТПУ регистратор электромагнитной и акустической эмиссий может быть успешно использован для мониторинга изменения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород и геодинамических проявлений в шахтных условиях рудников.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 11-07-00666-а

ЛИТЕРАТУРА

1. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Федотов П.И. Связь параметров электромагнитных сигналов с электрическими характеристиками горных пород при акустическом и квазистатическом воздействиях // Известия Томского политехнического университета. 2005, т. 308, № 7, с. 18-23.
2. Беспалько А.А., Федотов П.И., Яворович Л.В. Регистратор электромагнитных и акустических сигналов для контроля прочности и разрушения материалов и массивов горных пород // Известия Томского политехнического университета, 2008, № 2, т. 312, с. 255-258.

МЕТОД И АППАРАТУРА АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО МОНИТОРИНГА УЗЛОВ ПУСКА-ПРИЁМА ОЧИСТНЫХ И ДИАГНОСТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ

Оглезнева Л.А.

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: laoglezneva@tpu.ru

Проблема технического диагностирования состояния объектов магистральных нефтепроводов (МНП) в настоящее время наиболее актуальна. По данным Ростехнадзора 55% основных фондов в нефтяной промышленности отработали ресурс, 40% магистральных трубопроводов работает более 20 лет. Возникающие разрушения трубопроводов приводят к нарушению экологии, человеческим жертвам, наносят большой материальный ущерб. В связи с этим, разработка и применение методов и средств обеспечения эксплуатационной надёжности трубопровода – необходимое условие развития системы транспорта нефти.

Для предотвращения загрязнения окружающей среды нефтью, а также сокращения потерь перекачиваемых продуктов из-за повреждений и аварий необходимо осуществлять контроль экологически опасных и нагруженных участков МНП в режиме мониторинга.

Сравнительный анализ методов и средств мониторинга состояния ответственных узлов МНП, показал целесообразность применения метода акустической эмиссии (АЭ) [1,2,3]. Метод АЭ обеспечивает обнаружение, как нарушения герметичности, так и развивающихся дефектов, несущих наибольшую опасность целостности конструкции.

Одним из ответственных узлов МНП, требующего постоянного контроля, являются узлы пуска-приёма очистных и диагностических устройств (УППОДУ) МНП.

УППОДУ представляет собой сварочную конструкцию со множеством отводов и задвижек, предназначенный для пуска очистных (скребки) и диагностических (приборы внутритрубной диагностики) устройств и их вывода из трубопровода.

Общий вид конструкции УППОДУ представлен на рисунке 1.

В состав УППОДУ входят:

- камеры приема и пуска ОДУ;
- трубопроводы, арматура и соединительные детали;
- емкость для дренажа нефти из камер пуска и приёма;
- погружной насос откачки нефти из емкости;
- механизм для извлечения, перемещения и запаски ОДУ;
- сигнализаторы прохождения ОДУ;
- приборы контроля давления [4].

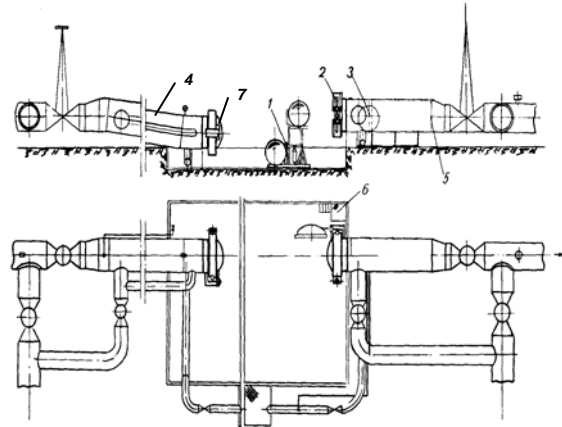


Рис. 1. Общий вид конструкции УППОДУ
1 – устройство ввода ОДУ, 2 – концевой затвор, 3 – ОДУ, 4 – камера пуска, 5 – камера приёма, 6 – колонка управления, 7 – крышка концевой затвора

Причины, вызывающие напряженное состояние в конструкции и приводящие к появлению дефектов и нарушению целостности УППОДУ во время эксплуатации МНП следующие [5,6,7]:

1. циклический характер изменения давления и температуры в МНП;
2. наличие множества различных концентраторов напряжений (сварные швы, повреждения), ускоряющих процесс циклического накопления повреждений;
3. механические воздействия во время пуска или приёма ОДУ;
4. конструкция испытывает сложное нагружение в силу своего расположения по трассе МНП, особенно в осенний и весенний периоды;
5. строительные-монтажные работы проводятся в сложных полевых условиях;
6. при длительной эксплуатации происходит изменение механических характеристик металла (деформационное старение), снижается ресурс пластичности на 15-20% (охрупчивание материала).

Под АЭ мониторингом будем понимать непрерывный процесс регистрации и локализации источников сигналов АЭ, появляющихся в контролируемом объекте при возникновении и развитии дефектов. АЭ мониторинг позволяет следить за развитием потенциальных дефектов и определять в реальном времени степень их опасности.

Таким образом, в задачи АЭ мониторинга конструкции УППОДУ входит:

- 1) выявление образования и развития дефекта;
- 2) выявление нарушения герметичности конструкции;
- 3) локализация повреждения;
- 4) определение характера повреждения.

Информативность параметров АЭ при нагружении материала из трубных сталей исследована и используется для технического диагностирования трубопроводов при эксплуатации и испытаниях [8].

АЭ – это явление, сопровождаемое едва ли не все физические процессы в твёрдых телах и на их поверхности. В связи с этим, возможность регистрации истинной АЭ, связанной с образованием и развитием дефектов в материале конструкции, сокращается с появлением посторонних источников шумов. При техническом диагностировании с применением метода АЭ на этапе предварительных испытаний объекта контроля (ОК) посторонние шумы выявляются и устраняются причины их возникновения, ОК находится под постоянным наблюдением оператора. От шумов, которые не удаётся минимизировать, осуществляется аппаратурная (частотная или амплитудная) отстройка.

Специфика рассматриваемого объекта АЭ мониторинга в том, что УППОДУ МНП расположен на открытой местности и подвержен воздействию атмосферных явлений (осадки, ветер), которые могут маскировать сигнал истинной АЭ. Поэтому проблема АЭ мониторинга УППОДУ состоит в выборе параметров и метода идентификации, позволяющего выделять сигналы истинной АЭ и указанных шумов. Из обзора литературы не ясно, как влияют указанные выше воздействия на выявление образования и развития дефектов в материале конструкции с помощью метода АЭ.

Разработка метода и аппаратуры АЭ мониторинга УППОДУ МНП требует решения следующих задач:

1. экспериментальное исследование процесса распространения акустического излучения в стенке ОК от ветра, града, дождя, снега, определение их влияния на характеристики сигналов от негерметичности концевой затвора, развития дефекта;
2. исследование и анализ АЭ характеристик трубных сталей;
3. исследование генерации и распространения АЭ излучения от развивающихся дефектов, нарушения герметичности конструкции УППОДУ;
4. поиск информативных критериев АЭ мониторинга УППОДУ на основании анализа параметров сигналов АЭ от атмосферных явлений на трубу и истинной АЭ, обусловленной течью и

развитием дефекта и идентификации указанных процессов;

5. разработка методики АЭ мониторинга УППОДУ;

6. выбор и обоснование характеристик аппаратуры АЭ мониторинга УППОДУ.

Для АЭ мониторинга УППОДУ необходимо установить набор параметров АЭ, несущих информацию о контролируемом процессе и выбрать наиболее информативные и помехоустойчивые.

Выявлена и подтверждена связь того или иного параметра сигнала АЭ с динамическими процессами в твёрдом теле, каждый параметр сигнала АЭ является акустическим отображением контролируемого процесса [10]. Так, амплитуда сигнала пропорциональна изменению площади трещины, количество импульсов – суммарной площади трещины, амплитудное распределение импульсов АЭ характеризует тип разрушения, положение максимума и ширина частотного спектра определяет стадии деформации, интенсивность потока импульсов и функция её изменения во времени связаны с прочностью конструкции и т. д.

О природе источников АЭ можно судить по форме и частотному спектру сигналов.

При деформации и развитии разрушения возникает совокупность волн высокой и низкой частоты. *Спектральный состав* излучения определяется как характеристиками среды, так и скоростью деформационных процессов и несёт информацию о природе источника АЭ.

Форма сигнала несёт информацию о тонкой структуре источника АЭ. Процессы кинетики микродеформирования и микроразрушения протекают дискретно во времени вследствие коллективных актов. Каждому коллективному акту повреждения материала (срыв лавины дислокаций; слияние микротрещин между собой, с макротрещиной и т.д.) соответствует первичный упругий импульс определённой длительности, процесс излучения которого представляет собой акт АЭ. Таким образом, длительность импульса АЭ несёт информацию о природе процессов, происходящих в материале. Энергия первичного акустического излучения при механическом деформировании излучается не колебательно, а в виде случайной последовательности импульсов. Среднюю длительность этих импульсов можно считать равной интервалу автокорреляции процесса излучения АЭ.

Предполагая, что однотипные источники порождают сигналы АЭ с подобными характеристиками и на основании проведённого анализа допустим, что длительность акта и спектр истинной АЭ и осадков различны и примем за параметры идентификации характеристики спектра – эффективная ширина и медианная частота, характеристику длительности

элементарного акта разрушения – интервал автокорреляции.

Основываясь на данных, полученных из литературных источников по численным значениям спектральных характеристик и длительности АЭ сигналов от истинной АЭ и полученных оценок этих параметров сигналов от воздействия атмосферных явлений на рис. 2, 3 приведены зависимости для выбранных параметров.

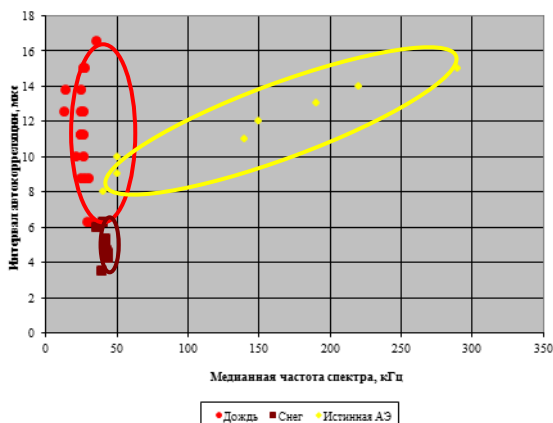


Рис. 2. Зависимость интервал автокорреляции – медианная частота спектра для сигналов истинной АЭ и шумов

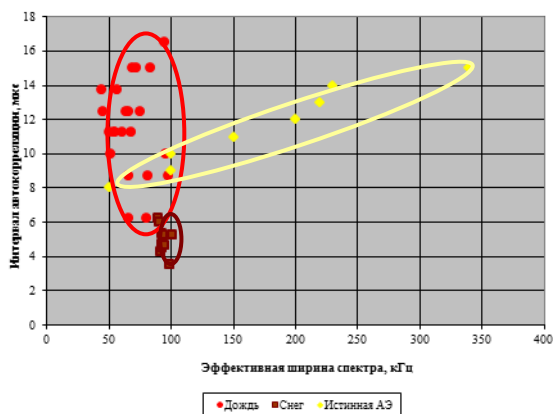


Рис. 3. Зависимость интервал автокорреляции – эффективная ширина спектра для сигналов истинной АЭ и шумов

Таким образом, характеристики формы и спектра сигналов воздействия атмосферных явлений существенно отличаются от параметров сигналов АЭ, связанных с пластической деформацией и развитием дефекта, что может быть положено в основу разработки системы АЭ мониторинга УШПОДУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аварийно-восстановительный ремонт магистральных нефтепроводов / Под ред. А. Г. Гумерова. – М.: ООО «Недра – Бизнесцентр», 1998. – 271 с.
2. Сравнение различных систем определения утечек из трубопроводов // Трубопроводный транспорт нефти. – 1998. – № 3. – С. 37–40.
3. Горкунов Э.С., Драгошанский Ю.Н., Миховски М. Эффект Баркгаузена и его использование в структуроскопии ферромагнитных материалов (обзор II) 2. Влияние упругой и пластической деформации. // Дефектоскопия. – 1999 – №7. – С.3–32.
4. Мацкин Л.А., Рабинович Е.З., Шварц М.Э, Кузнецов П. Б. Очистка нефтепроводов и методы предупреждения накопления парафиновых отложений // ОНТИ по транспорту и хранению нефти и нефтепродуктов. – М.: ВНИИОЭНГ, 1968. – 130 с.
5. Эксплуатация магистральных нефтепроводов: Справочное изд. / Под ред. Ю. Д. Земенкова. – Тюмень.: ТюмГНГУ, 2000. – 534 с.
6. Влияние длительности и условий эксплуатации магистральных трубопроводов на сопротивление разрушению металла труб / В.А. Синельников, Г.А. Филиппов, В.В. Курочник, Г.А. Вдовин //Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. – 2000. – № 4. – С. 12–13.
7. Дудин С.М., Земенков Ю.Д., Антипов В.Н., Кривохижа В.Н. Аварии и отказы на магистральных трубопроводах, их причины //Геотехнические и эксплуатационные проблемы нефтегазовой отрасли: материалы международного семинара. – Под ред. С.Я. Кушнира. – Тюмень: ТюмГНГУ. – 2002. – 260 с.
8. Батуев В.Г., Федорчук А.В., Ченцов В.П. Акустико-эмиссионные характеристики трубных сталей при одноосном растяжении образцов // Дефектоскопия, 1991.- № 11.- С. 51-56.
9. Диагностика материалов и конструкций топливно-энергетического комплекса /В.М. Баранов, А.М. Карасевич, Е.М. Кудрявцев и др. – М.: Энергоатомиздат. – 1999. – 360 с.
10. Грешников В.А., Дробот Ю.В. Акустическая эмиссия. – М.: Издательство стандартов, 1976. – 272 с.

ЕЩЁ РАЗ К ВОПРОСУ ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОВОЙ ТОМОГРАФИИ

Троицкий О.Ю.¹, Harald Reiss², Медведев В.В.¹

¹ Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30,
E-mail: tor43@mail.ru

² Department of Physics, University of Wuerzburg, Am Hubland, D-97074 Wuerzburg,
Germany

Когда исследуемый объект (или материал) совсем неизвестен, т. е. неизвестна его структура, возникает необходимость одновременного определения его теплофизических свойств и толщины слоя исследуемого материала. Таким образом, мы сталкиваемся с проблемой тепловой томографии, которая не решена до сих пор надлежащим образом. Невозможность одновременного определения вышеуказанных величин имеет двойную природу: теоретическую и экспериментальную. Наиболее вероятно, что экспериментальные проблемы вызваны теоретическими, поскольку до сих пор не разработаны подходящие алгоритмы для определения искомых величин. Теоретические проблемы вызваны тем, что искомые величины входят в решения дифференциальных уравнений теплообмена в виде сомножителей и их трудно разделить. Экспериментальные проблемы, которые необходимо решить при наличии готовых алгоритмов, заключены в методике эксперимента, поскольку требуется высокоскоростное измерение переменной температуры на поверхности исследуемого объекта. Используя наши предыдущие работы [1,2], мы предлагаем возможный подход к решению указанной проблемы.

Для анизотропных материалов, имеющих температуропроводность a , аксиальная компонента a_x может быть найдена таким же образом, какой был предложен в работе [1]:

$$a_x = -\frac{b^2 \ln F}{\Delta \tau \pi^2}, \quad (1)$$

$$\text{где } F = \frac{\sum_{k=1}^n T^k \sum_{k=1}^n T^{k-1} - n \sum_{k=1}^n T^k T^{k-1}}{\left(\sum_{k=1}^n T^{k-1}\right)^2 - n \sum_{k=1}^n (T^{k-1})^2}.$$

В уравнении (1) T^k обозначает температуру, измеренную в момент времени t_k в центре пятна нагрева на поверхности исследуемого объекта, n представляет собой число измерений температуры, проведенных в этой точке с шагом по времени $\Delta \tau$, b представляет собой толщину слоя исследуемого материала (правила для определения $\Delta \tau$ представлены в работе [1]).

Радиальная компонента a_r может быть найдена с использованием соотношения, полученного в работе [2]:

$$a_r = \frac{\frac{T_i^k - T_i^{k-1}}{\Delta t}}{\frac{T_{i+1}^k - T_i^{k-1}}{2r_i \Delta r} + \frac{T_i^k - 2T_i^k + T_{i-1}^k}{(\Delta r)^2}}. \quad (2)$$

В уравнении (2) T_i^k представляет собой температуру, измеренную в момент времени t_k на поверхности исследуемого материала в точках $r=r_i$. Временные Δt и пространственные Δr интервалы определяются соотношениями $\Delta t = t_k - t_{k-1}$, $\Delta r = r_{i+1} - r_i$.

Для гомогенных изотропных материалов $a_x = a_r = a$, и мы будем иметь два уравнения (1,2) относительно двух неизвестных a и b (т. е. относительно искомых величин температуропроводности и толщины слоя).

Решая эти уравнения, получим

$$a = \frac{\frac{T_i^k - T_i^{k-1}}{\Delta t}}{\frac{T_{i+1}^k - T_i^{k-1}}{2r_i \Delta r} + \frac{T_i^k - 2T_i^k + T_{i-1}^k}{(\Delta r)^2}}, \quad (3)$$

$$b = \left(-a \frac{\Delta \tau \pi^2}{\ln F}\right)^{0.5}. \quad (4)$$

Таким образом, мы предлагаем возможный подход к решению названной проблемы для однослойной системы и для первого слоя многослойной системы.

Сведения о точности приведенного метода представлены в работах [1,2].

Таким образом, эта первая стадия исследования дает идею и возможность определения толщины и температуропроводности покрытий и (или) модифицированных поверхностных слоев различных материалов, а также выявлять глубину залегания дефектов (трещин, отслоений и др., т. е. неоднородность физических характеристик) в исследуемых объектах.

ЛИТЕРАТУРА

1. O. Yu. Troitsky and H. Reiss. Remote nondestructive monitoring of coatings and materials by the flash technique // High Temperatures - High Pressures. - 2000. - V.32. - P. 391 - 395.

2. O. Yu. Troitsky and H. Reiss. A numerical simulation to propose a flash method for in-situ detection of the thermal diffusivity of anisotropic thin film materials // Int.J.Thermophysics. - 2009. - V.30, №4. - P. 1283-1299.

РАДИОТОМОГРАФИЯ ПО ВЫБОРОЧНЫМ ДАННЫМ

Якубов В.П., Шипилов С.Э., Клоков А.В., Федянин И.С.

Томский государственный университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36

E-mail: yvlp@mail.tsu.ru

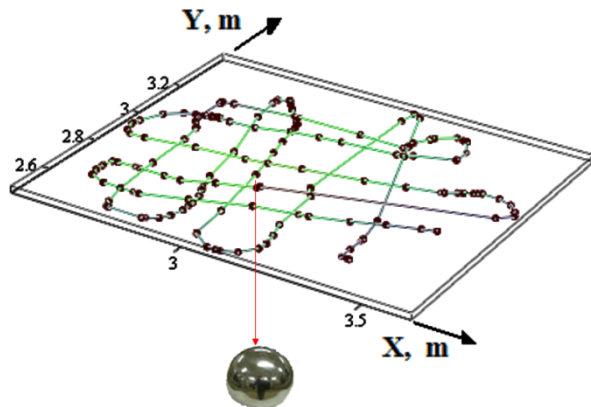
В последнее время усилился интерес к использованию сверхширокополосных (СШП) систем зондирования для различных задач дистанционного зондирования скрытых предметов. Такие задачи возникают при подповерхностной локации (Ground Penetrating Radar - GPR), локации инженерных сооружений, при поиске опасных предметов в багаже и под одеждой на теле человека. Радиоволновые системы выступают как наиболее перспективные и альтернативные к рентгеновским системам просвечивания, прежде всего по требованию безопасности использования. Как и все томографические системы СШП системы требуют многоракурсности съёма информации. К сожалению, последовательный поэлементный обзор исследуемых сцен не всегда возможен. Так возникает необходимость разработки методов восстановления томограмм по неполным данным (Compressive Sensing - CS). Существующие методы оставляют желать лучшего, как по точности восстановления изображений, так и по

быстродействию [1]. Настоящая работа направлена на преодоление существующего пробела на основе развития метода фокусировки с использованием процедуры многомерной согласованной фильтрации. При этом ключевым элементом является восстановление аппаратной функции системы (АФС) [2].

Эксперимент по получению CS данных проводился в условиях лабораторного павильона Центра Исследований Северо-Восточной Азии Университета Тохоку (Сендай, Япония, 2011 г.) со стандартным GPR оборудованием, работающим в режиме реального времени и дополненного лазерной системой постоянного контроля координат зондирования «iGPS» (indoor Global Position System) (рис. 1а). Перемещение радарного блока осуществлялось вручную по относительно произвольной траектории. На рис. 1б кружочками отмечены точки измерений. В качестве тестового объекта был выбран металлический шар диаметром 15 см, помещенный в песок на глубину порядка 20 см



а



б

Рис. 1. Подповерхностный локатор и схема проведения измерений

Поскольку выбранная траектория зондирования не представляет собой регулярную кривую и не покрывает всю сетку положений точек наблюдения, необходимую для реализации стандартного метода радара с синтезированной апертурой, то проведенные измерения можно считать типичными для неполных измерений (CS). На рис. 2 в виде градаций серого цвета изображены измеренные данные в зависимости от положения на траектории измерений (горизонтальная ось) и от времени (вертикальная ось). Отчетливо видны отражения от границы раздела сред воздух-песок и следы от дифракционных гипербол, обусловленных отражениями сигналов от тестового объекта,

скрытого в песке. Для обработки представленных данных применим метод многомерной согласованной фильтрации. В исходном виде суть метода состоит в том, что для каждого выбранного слоя фокусировки строится своя АФС.

Под АФС мы будем понимать фазовый отклик системы на точечную неоднородность, располагающуюся в центре выбранной плоскости фокусировки на глубине h_F от плоскости регистрации, на которой находятся точки излучения-приема ρ :

$$Q(\rho, h_F; f) = \exp \left\{ i \frac{4\pi}{v} f \sqrt{\rho^2 + h_F^2} \right\}$$

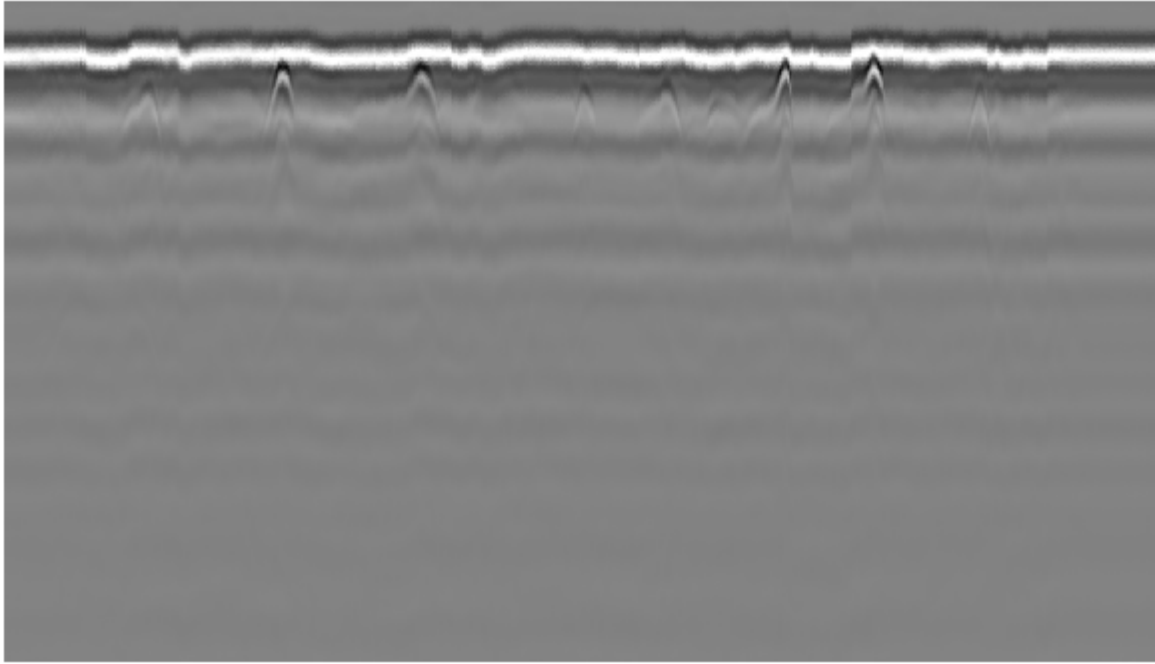


Рис. 2. Данные Compressive sensing GPR (CS GPR)

Здесь f - частота зондирования, v - скорость распространения волны. Если реальная неоднородность распределена в нижнем полупространстве V_1 с интенсивностью $\sigma(\rho_1, z_1)$, то комплексная амплитуда измеряемого в точке ρ поля в приближении однократного рассеяния с точностью до некоторого постоянного множителя определяется как

$$E(\rho; f) = \iiint_{V_1} \sigma(\rho_1, h_1) \frac{Q(\rho - \rho_1, h_1; f)}{(\rho - \rho_1)^2 + h_1^2} d^2 \rho_1 dh_1.$$

Двумерная согласованная фильтрация этого поля с использованием аппаратной функции сводится к вычислению пространственной корреляционной функции

$$U(\rho_F, h_F; f) = E(\rho_F; f) \otimes Q^*(\rho_F, h_F; f) \equiv \iint E(\rho_F; f) Q^*(\rho - \rho_F, h_F; f) d^2 \rho. \quad (1)$$

Здесь и далее * означает комплексное сопряжение.

Результаты численного моделирования показывают, что если выбранный слой фокусировки лежит в пределах зоны Френеля от плоскости зондирования, то возникающая при этом подынтегральная функция

$$W(\rho_1, \rho_F, h_1, h_F; f) \equiv \iint Q^*(\rho - \rho_F, h_F; f) Q(\rho - \rho_1, h_1; f) d^2 \rho$$

локализуется в поперечной плоскости и существенно упрощается в вертикальном направлении

$$W(\rho_1, \rho_F, h_1, h_F; f) \approx W_0(\rho_F, h_F) \delta(\rho_1 - \rho_F) \exp \left\{ i \frac{4\pi}{v} f (h_1 - h_F) \right\}.$$

Далее после интегрирования по всем доступным для использования временным частотам получаем, что

$$\int U(\rho_F, h_F; f) df \approx \sigma(\rho_F, h_F) \frac{W_0(\rho_F, h_F) v}{\rho_F^2 + h_F^2}.$$

Это выражение дает решение задачи томографии методом согласованной фильтрации:

$$\sigma(\rho_F, h_F) = \left[\frac{W_0(\rho_F, h_F) v}{\rho_F^2 + h_F^2} \right]^{-1} \int E(\rho_F; f) \otimes Q^*(\rho_F, h_F; f) df. \quad (2)$$

Восстанавливается изображение сразу на всю выбранную плоскость. Метод работает быстро при использовании алгоритма быстрой свертки. Для перехода на другую плоскость фокусировки необходимо строить новую АФС. Скрытое достоинство метода – обязательно иметь сверхширокую полосу временных частот.

С точки зрения использования неполных (CS) или неэквидистантных (неравномерных) данных измерений нами предлагается использовать вариант Фурье-интерполяции, при котором точки матрицы измерений в отсутствии в них данных, заполняется нулями. Далее такой радиолокационный отклик трансформируется в область пространственных частот. За счет дополнения радиолокационного отклика нулями в спектре пространственных частот возникают необоснованные (ложные) значения на высоких частотах. Если эти частоты правильно отфильтровать и вернуть изображение из частотной в пространственную области, то это даст нужную процедуру интерполяции. Необходимы всего две быстрые операции -

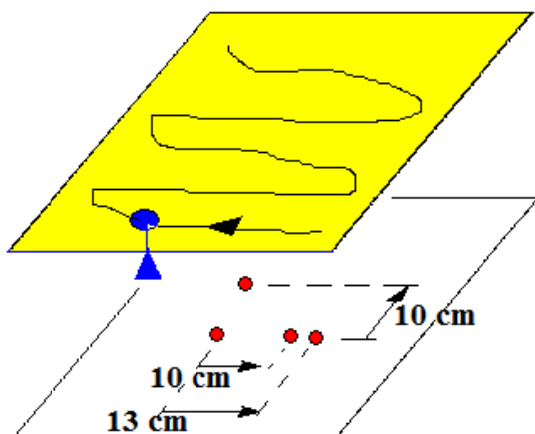
прямое и обратное преобразование Фурье. Процедура выбора необходимого фильтра - достаточно сложная задача, но её удастся избежать, если в спектральную область перевести также АФС. В спектре полной АФС «паразитных» верхних частот просто нет. Теперь достаточно перемножить спектры изображения и АФС. Далее остается осуществить обратное преобразование Фурье и тем самым одновременно будут реализованы и интерполяция, и фокусировка изображения на выбранную плоскость, соответствующую АФС. Таким образом, описанная процедура получения томограммы с интерполяцией ускорится не менее, чем в 20 раз еще на этапе сканирования – самом медленном из всех необходимых этапов.

Для того чтобы убедиться в работоспособности предложенных решений и заодно отработать алгоритм восстановления 3D томограммы была проведена симуляция проблемы обработки

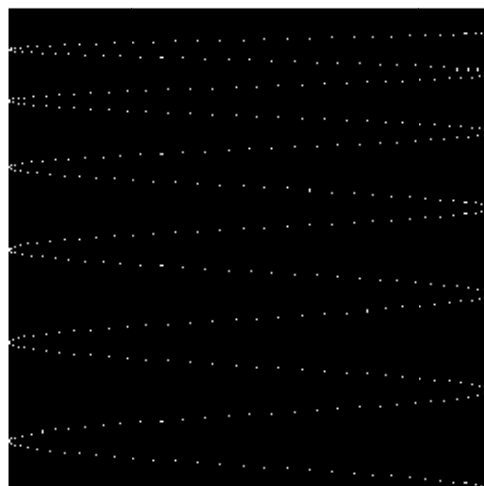
неполных данных. Была выбрана траектория зондирования, показанная на рис. 3. Были рассмотрены 4 точечных неоднородности расположенные в одной плоскости на глубине 15 см. Зондирование для площадки размером 1x1 м имитировалось в полосе частот 6-12 ГГц.

На рис. 4а показан пример того, как бы выглядел локационный отклик на заданную групповую неоднородность, если бы из полных локационных данных 256x256 точек, взятых с шагом 4 мм, оставить только 400 точек измерений. Это около 6 % всех данных. Остальное поле измерений обнулено. Измерения имитировались на частоте 10 ГГц. На рис. 4б показан пример восстановления томограммы с использованием описанной методики.

Наблюдается достаточно уверенное восстановление расположения неоднородностей, что указывает перспективность предложенного метода.

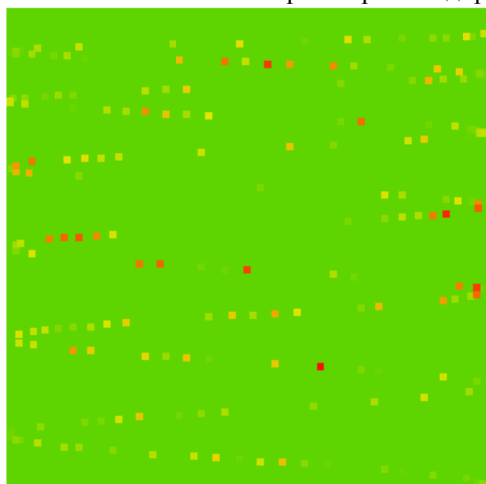


а

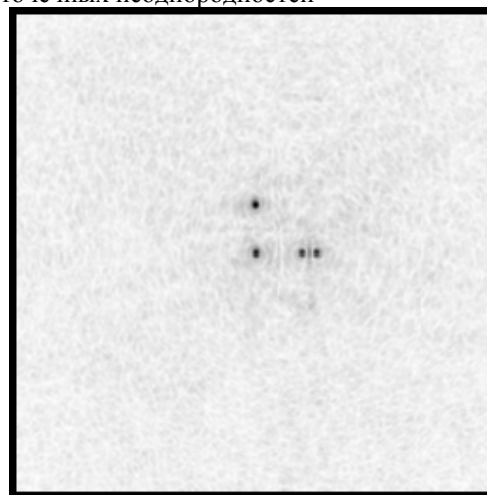


б

Рис. 3. Траектория зондирования 4-х точечных неоднородностей



а



б

Рис. 4. Локационный отклик на групповую неоднородность в случае неполных данных (а) и восстановленная на его основе томограмма (б)

Разработанная методика была применена к описанным реальными GPR данным. Для

использования этой методики было необходимо сначала восстановить АФС. Лучше всего было бы

провести специальные измерения на достаточно подробной сетке точек измерений. Однако, на практике это не всегда удается сделать. В этой ситуации можно воспользоваться наиболее удачным фрагментом измерений. В нашем случае для этого был взят один из фрагментов картины показанной на рис. 2. Такой фрагмент общей картины представлен на рис. 5а. Этот фрагмент вполне может быть интерпретирован как дифракционная гипербола аппаратной функции. Эти данные позволили рассчитать вид аппаратной функции системы. Соответствующий фрагмент показан на рис. 5б. Теперь осталось выполнить

Фурье интерполяцию неполных данных и согласованную фильтрацию. Результат – вертикальное и горизонтальное сечения восстановленной 3D томограммы представлен на рис. 6. В дополнение ко всему здесь в каждой точке плоскости XOY осуществлен переход к аналитическому сигналу в вертикальном направлении и взят его модуль – огибающая. Это позволило повысить однозначность интерпретации результата. Полученные данные хорошо согласуются с результатами прямых измерений с помощью шупа.

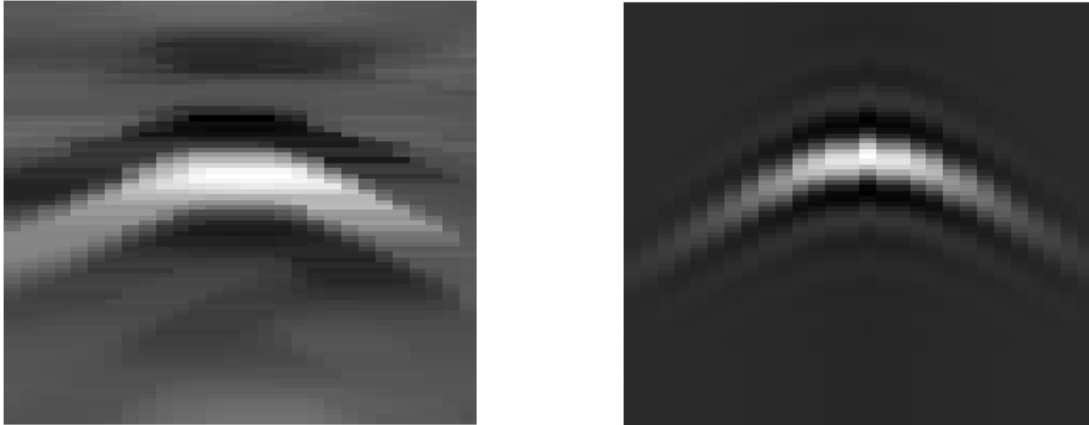


Рис. 5. Фрагменты экспериментальных данных (а) и рассчитанной (б) АФС

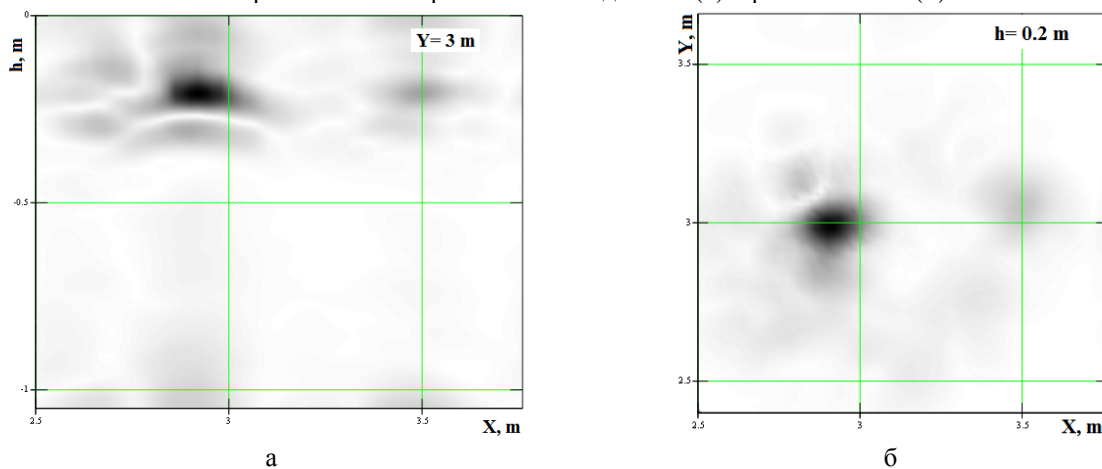


Рис. 6. Два ортогональных сечения 3D томограммы, восстановленной по неполным экспериментальным данным

Проведенные исследования подтверждают работоспособность разработанного метода восстановления 3D томограммы по неполным экспериментальным данным.

Работа выполнена при поддержке Российских программ АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» мероприятие 2, проект № 2.1.2/12874, а также ФЦП в рамках мероприятий 1.1. (ГК № 14.740.11.0076), 1.2.2 (НК-104П/2) и 1.3.1 (НК-181П/6).

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Gurbuz, J. McClellan, W. Scoott. «A Compressive Sensing Data Acquisition and Imaging Method for Stepped Frequency GPRs» // IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 57, No. 7, July 2009, pp. 2640-2650.
- 2 Якубов В.П., Склярчик К.Г., Пинчук Р.В., Суханов Д.Я. и др. Радиоволновая томография скрытых объектов для систем безопасности // Известия высших учебных заведений. Физика. 2008, № 10. - Томск: ТГУ, - С. 53-60.

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ШОРА В ВИРТУАЛИЗИРОВАННОМ ТВЕРДОМЕРЕ

Донцов А., Прокопов Д., Сальников К., Петрицкий Р.

Научные руководители: Дмитриев С.Ф., к.т.н., доц., Ишков А.В.*, к.х.н., д.т.н., проф.

ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный университет»,

*ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный аграрный университет»,

656049, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, 61

E-mail: alexdontsov@yandex.ru

Ранее нами были разработаны виртуализированные измерительные приборы (ВИП) - современные измерительные программно-аппаратные (ПА) комплексы, базирующиеся на максимальной виртуализации функций измерительного устройства, не связанных с непосредственным получением информации от контролируемого объекта и среды [1], и предназначенные для решения частных задач электромагнитных измерений: измерения предельно-допустимого уровня электромагнитных излучений (по магнитной компоненте ЭМИ), измерения напряженности постоянного и переменного магнитного поля, исследование спектральной характеристики ЭМИ в звуковом диапазоне, измерение электропроводности неферромагнитных материалов, измерение электропроводности полупроводников и пр. [1, 2].

Используемый в этих ВИП метод вихревых токов (МВТ) основан на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых возбуждающей катушкой в электропроводящем объёме контроля. Плотность вихревых токов в объекте зависит от геометрических и электромагнитных параметров объекта, а также от взаимного положения измерительного вихревого преобразователя, его конструкции и от объекта контроля. В качестве датчика в разработанных ВИП использован сверхминиатюрный вихретеоковый преобразователь (СМВТП) индуктивного типа [3]. Синусоидальный или импульсный ток с известными характеристиками, поступающий на возбуждающую катушку СМВТП с аналогового выхода (ЦАП) звуковой карты ПК, создает электромагнитное поле, которое преобразуется и направляется к объекту контроля магнитопроводом-концентратором датчика и возбуждает в нем вихревые токи. Поле вихревых токов, воздействуя на приемную катушку СМВТП, наводит в ней ЭДС и изменяет ее полное электрическое сопротивление. Сигнал с приемной катушки подается на вход (АЦП) звуковой карты и после программной обработки рассчитываются его характеристики. Программная часть ВИП управляет входами-выходами АЦП/ЦАП ПК, в реальном времени регистрирует напряжение на выводах катушек СМВТП или их сопротивление, осуществляет обработку измерительных сигналов и позволяет получать информацию о свойствах

объекта или положении преобразователя относительно него.

Используя зависимость измерительного сигнала от положения СМВТП относительно объекта контроля [4], которая восстанавливается программой ВИП и на основе вычисления логарифмического декремента затухания колебаний датчика над электропроводящей поверхностью, нами был разработан метод измерения твердости, результаты которого хорошо коррелируют со стандартизированным динамическим методом упругой отдачи (метод Шора) по ГОСТ 23273-78. Этот метод был реализован в новом ВИП - твердомере ТШМ-1У, предназначенном для измерения твердости металлических, полимерных и композиционных проводящих материалов.

Конструкция используемого в разрабатываемом приборе СМВТП (рис. 1), обеспечивает его работу в режиме самосравнения, однако типовой датчик изготовлен по принципу сравнения со стандартным образцом, т.е. рабочий и образцовый преобразователи не связаны индуктивно и имеют независимые измерительные и возбуждающие обмотки [5]. Такое оформление СМВТП обеспечивает измерение характеристик материалов с относительной погрешностью уже до 0,1-0,5 %, защищает рабочий ВТП от внешних наводок и позволяет использовать его для комплектования, например измерителя электропроводности неферромагнитных материалов ИЭНМ-20М, разработанного нами ранее.

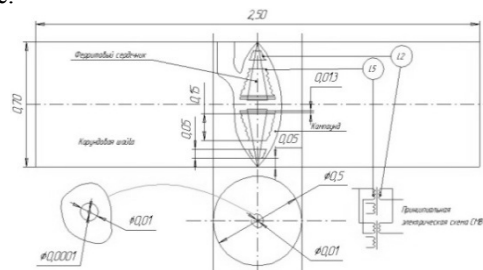


Рис. 1. Эскизный чертеж СМВТП для измерений в режиме самосравнения

Дифференциальное включение катушек и фокусировка возбуждающего поля сердечником позволяет с датчиком этого типа проводить высокочувствительные локальные исследования проводящих материалов на площади 50 - 80 мкм².

Для измерения же характеристик затухающего процесса в рабочем датчике обе части СМВТП

были выполнены на общем бипирамидальном магнитопроводе а включение их катушек в цепь первичного преобразователя - полностью независимое. В качестве материала сердечников СМВТП использовался среднечастотный малодиссипативный феррит, выбранный из ферритов марки 2000 НМЗ по величине максимальной начальной магнитной проницаемости. Была разработана технология изготовления сигнальных и генераторных катушек с использованием оригинальной оснастки для микроминиатюрных намоточных работ. Катушки СМВТП пропитаны эпоксидным компаундом и обеспечивают устойчивую работу датчика при температурах до 200 °С, а сам датчик с системой распайки помещается в пластмассовый корпус держателя.

Для реализации виртуализированного измерительного прибора МВТ, СМВТП подключается непосредственно к разъемам звукового адаптера ПК, а запуск специализированного программного обеспечения обеспечивает конфигурирование и работу всего измерительного ПА-комплекса.

В приборе ТШМ-1У реализованы два способа измерения твердости, основанные на прямой пропорциональной зависимости значения логарифмического декремента затухания колебаний СМВТП от твердости материалов по шкалам HSD, HV, HB, HRC и др. В случае подключения одного из разработанных нами датчиков - СМВТП, защищенный корундовой шайбой - определяются характеристики твердости по параметрам свободного затухающего процесса, что позволяет производить относительные измерения твердости по шкале HSD с точностью до 3-5 %. Второй тип датчика снабжен алмазной инденторной головкой специальной формы (ГОСТ 9377-81) и прижимается к поверхности материала тарированной пружиной, что позволяет определять абсолютные значения твердости материалов по различным шкалам с точностью до 0,5-0,7 % и выше (табл. 1).

Таблица 1

**Технические характеристики
разрабатываемого твердомера**

1	Число встроенных программ измерений	6
2	Единицы измерения твёрдости	HV, HRC, HRN30, HB, HSD
3	Диапазон измерения твёрдости, HSD	от 30 до 97
4	Перевод чисел твёрдости	автомат.
5	Пределы допускаемой погрешности прибора, %	0,5 - 5,0
6	Индикация значений твёрдости	буквенно-цифровая
7	Питание внешнего датчика	автономное

Использование архитектуры специализированных измерительных программно-аппаратных комплексов [4] позволило в приборе ТШМ-1У легко реализовать многие сервисные функции: - автоматический пересчет твердости из шкалы HSD в шкалы HB, HRC, HRN30 и HV; - статистическая обработка, накопление и хранение полученных результатов; - выбор и корректировка параметров калибровочной кривой; - разбраковки изделий по

На данном этапе разработки нами реализован действующий макет-прототип измерительного устройства, который представляет собой СМВТП-датчик первого типа, сопряженный с коммерческим беспроводным приемником-передатчиком F1, подключаемый к компьютеру по Bluetooth 2.0-каналу (рис. 2), и специализированное программное обеспечение, выполненное в виде самоисполняемого в ОС Windows *.exe файла, в котором реализованы все функции по измерению, преобразованию и обработке сигнала от ВТП.



Рис. 2. Внешний датчик прототипа твердомера ТШМ-1У с ГСО

Отличительной особенностью ТШМ-1У является беспроводное исполнение внешнего датчика, возможность проведения измерений при любом его положении относительно поверхности образца и уменьшение массы образца с 0,1 до 0,001 г, что позволяет использовать прибор для оперативного контроля твёрдости изделий в цеховых и лабораторных условиях.

Область применения ТШМ-1У: металлургическое производство, машиностроение, металлообработка, производство изделий из композитов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев С.Ф., Ишков А.В., Лященко Д.Н., Новоженев А.В. // Научные исследования: информация, анализ, прогноз. – Воронеж: ВГПУ, 2010. С. 580-592.
2. Ишков А.В., Дмитриев С.Ф. // Мат. Междунар. научн.-техн. конф. «ИКИ-2007». - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2007. С.3-6.
3. Дмитриев С.Ф., Панов С.Г., Ишков А.В. // Ползуновский альманах. № 2. 2008. С. 15-20.
4. Рябинин А.А., Маеренко А.А., Панов С.Г. и др. // Горизонты образования. Вып.10. 2008.
5. Ишков А.В., Дмитриев С.Ф., Новоженев А.В., Лященко Д.Н. // Труды VII-ой научн.-техн. конф. по НПО. – СПб.-М.: Изд-во Нестор, 2009. С. 82-89.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ КВЧ АНТЕНН ДЛЯ СИСТЕМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Трубачев А.А., Юрченко В.И.

Россия, ОАО НИИ Полупроводниковых Приборов (г. Томск)

Системы ближней радиолокации КВЧ диапазона длин волн, работающие в диапазоне малых дальностей (от долей миллиметра до одного метра), начинают широко использоваться в системах охранной сигнализации и кодированного пропуска, устройствах сближения и стыковки, в том числе для создания интеллектуальных систем безопасности. В последние годы уверенный рост интереса к таким системам связан с развитием микроволновых миллиметровых устройств, вплоть до комбинирования микроволнового приемопередатчика со специфическими *patch*-антеннами, а также существенным снижением стоимости СВЧ узлов таких систем.

Антенна является конвертором электрического тока радиочастотного диапазона в электромагнитное излучение и наоборот. Форма, размеры и конструкции антенн разнообразны и зависят от длины излучаемых или принимаемых волн и назначения антенны. Каждая антенна как пассивное линейное устройство может работать в

режимах передачи и приема. В обоих режимах антенна характеризуется направленными, поляризационными, фазовыми свойствами и входным импедансом. К основным характеристикам и параметрам, описывающим эти свойства, относятся:

- диаграмма направленности (ДН);
- коэффициент направленного действия (КНД);
- коэффициент усиления антенны (КУ);
- поляризация;
- полоса пропускания;
- входной импеданс и коэффициент стоячей волны (КСВ);
- шумовая температура антенны (T_A).

Диаграмма направленности (ДН) — зависимость амплитуды вектора напряженности поля антенны в дальней зоне от угловых координат точки наблюдения P , то есть зависимость $f(\theta, \varphi)$ — все значения $E(\theta, \varphi)$ делят на максимальное значение E_m и обозначают нормированную ДН символом $F(\theta, \varphi)$.

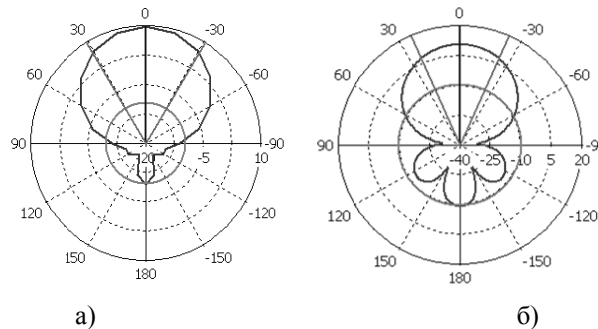


Рис. 1. Диаграмма направленности а) спиральной микрополосковой антенны; б) микрополоскового биконического диполя

ДН обычно описываются не только в плоскости, но и в трехмерном отображении и для упрощения рассмотрения оных используют две проекции ДН:

- горизонтальную (азимутальная);
- вертикальную (по углу места).

По способу формирования излучаемого поля, выделяются четыре класса антенн:

1. Излучатели небольших размеров ($l \leq \lambda$) для диапазона частот 10 кГц– 1 ГГц. К числу антенн этого класса относятся одиночные вибраторные и щелевые излучатели, полосковые и микрополосковые антенны, рамочные антенны, а также частотно-независимые антенны.

2. Антенны бегущей волны размерами от λ до 10λ для диапазона частот 3 МГц – 10 ГГц. Сюда относятся спиральные, диэлектрические,

директорные, импедансные антенны, а также антенны «вытекающей» волны.

3. Фазированные антенные решетки размерами от λ до 100λ для диапазона частот 3 МГц – 30 ГГц. Это антенны, состоящие из большого числа отдельных излучателей. Независимая регулировка фаз (а иногда и амплитуд) возбуждения каждого элемента антенной решетки обеспечивает возможность электрического управления диаграммой направленности. Применяются линейные, плоские, кольцевые, выпуклые и конформные (совпадающие с формой объекта установки) антенны. На основе антенных решеток выполняют антенные системы с обработкой сигнала, в том числе адаптивные к изменяющейся помеховой обстановке.

4. Апертурные антенны размерами от λ до 100λ и более для частот 100 МГц – 100 ГГц и выше. Наиболее распространены зеркальные, рупорные и линзовые апертурные антенны. К апертурным антеннам примыкают так называемые «гибридные» антенны, представляющие сочетание зеркал и линз с облучающей системой в виде антенной решетки. Апертурные антенны строятся по оптическим принципам и обеспечивают наиболее высокую направленность излучения.

При моделировании антенны, использовали следующие данные:

- диапазон частот 40 – 80 ГГц;
- ширина диаграммы направленности в азимутальной плоскости не более 20° ;
- габариты оптимизируются.

Для данного диапазона частот наиболее подходящими являются апертурные антенны.


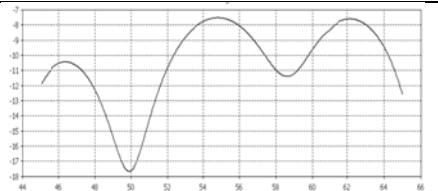
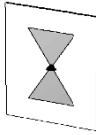
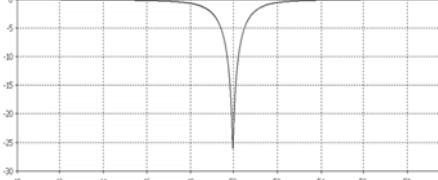
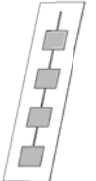
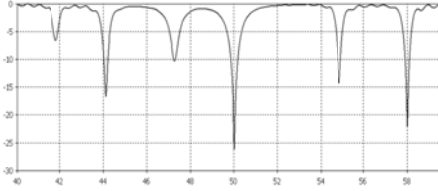
Но исходя из последних данных института инженеров электротехники и электроники (ИИЭЭ), секции Антенны и распространение радиоволн (Antennas and Propagation), в миллиметровом диапазоне длин волн активно ведется освоение микрополосковых антенн различного вида.

Что касается второго критерия, опять же, антенны с наиболее узким лучом – это апертурные. Но их размеры, по сравнению со всеми остальными, слишком велики.

Проанализировав все вышеперечисленные пункты, было предпринято остановить свой выбор на микрополосковой плоской антенне.

Предложена методика расчета диаграмм различных плоских антенн и результаты моделирования в КВЧ диапазоне длин волн представлены в таблице.

Таблица

Тип антенны	Модель антенны	Ширина ДН	КСВ на частоте сигнала	Габариты мм	Зависимость S_{11} от частоты
Спираль		$61,8^\circ$	1,3	4x4x0,5	
Биконический диполь		$47,2^\circ$	1,1	6,7x7,8x0,5	
Печатная решетка		15°	1,1	17x4x0,5	

Показана возможность построения автодинного КВЧ датчика на основе активной плоской антенны с диодом Ганна. Наименьшими габаритами обладает датчик со спиральной антенной, а наиболее узкую диаграмму обеспечивает печатная решетка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воторопин С. Д., Юрченко В. И. Автодины на диодах Ганна и устройства на их основе // Электронная промышленность. – 1998. – Вып. 1-2. – С. 110-115.
2. Antenna Engineering Handbook Fourth Edition, Dr. John L. Volakis, 2007

МЕТОД СВЧ ДЕФЕКТОСКОПИИ МЕТАЛЛОВ

Суторихин В.А.

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: wind@tomsk.mail.ru

Необычность явления, положенного в основу проводимого исследования, раскрывает новые возможности практического использования метода неразрушающего контроля, но одновременно требует значительных усилий по определению физических параметров исследуемых образцов. В частности, известно, что пластическая деформация при механическом нагружении всегда сопровождается актами Акустической Эмиссии (АЭ) [1]. Известно также, что акты АЭ практически не наблюдаются после прекращения действия возмущающего фактора (тепловой или механической нагрузки). Известно, что акты АЭ происходят спонтанно, имеют «мерцательный» характер при непрерывном действии фиксированной нагрузки.

Новые данные о физических процессах [2], предшествующих изменению физического состояния поверхностной проводимости металла, позволяют связать эти процессы с известными актами появления сигналов Акустической Эмиссии. Авторам известны работы [3], связывающие появление локальных областей механического напряжения с актами АЭ. По совокупности отличительных признаков (локальность области механического нагружения, изменение уровня Ферми в этих областях) можно сравнить оба процесса, их физическое проявление. Отмеченное сходство процессов, положенных в основу метода АЭ и нового метода, названного авторами методом «Микроволновой Дефектоскопии» (МВД), касается индикации активных дефектов. Оба метода относятся к неразрушающим. Оба основаны на обнаружении активных источников (для АЭ активных акустических, для нового метода – активных дефектов, взаимодействующих с ультразвуком и рождающих переменную поверхностную проводимость). Но есть и существенные отличия.

Так авторами метода обнаружено свойство последствия - сохранение режима активности после прекращения механического воздействия

Вторая особенность нового метода – жесткая связь между свойством «активности» дефекта и свойством преобразования ультразвука в переменное состояние поверхностной проводимости образца. Никакой шумовой источник акустического типа не приводит к появлению полезного сигнала без присутствия «активных» дефектов в образце (в теле или на поверхности).

Третье существенное отличие состоит в скорости появления сигналов. Отношение скоростей электрического поля и звука

$$(V_{эл}/V_{зв}=50^3(км/с)/5(км/с)=1000(раз))$$

ясно показывает, что новое явление значительно опережает сигналы Акустической Эмиссии.

Четвертое существенное отличие – «мерцательный» характер сигналов активности проявляется только при особенных свойствах объема исследуемого тела.

Пятое, самое главное существенное отличие – дистанционность определения дефектов (рабочее расстояние от 0,2 до 5 метров)

Описываемый этап исследований относится к заключительному, предполагает вариант выбора коммерчески выгодных схемных решений лабораторного оборудования на основе множества экспериментальных исследований, полученных патентов на метод и устройства [4,5]. Разработанный комплект дистанционного индикатора активных дефектов (ДИАД) не потребует чрезмерно сложных технологий, позволит использовать не самые чувствительные варианты СВЧ сенсора, не применять лазерные дистанционные генераторы ультразвуковых волн, однако получить ощутимое преимущество в определении активных дефектов ЖД колес по сравнению с известными. Заключительной целью данного исследования - определение возможности регистрации уровня дефектов испытываемого обода ЖД локомотива комплектом ДИАД. Для выполнения этих работ был изготовлен улучшенный лабораторный образец СВЧ сенсора рабочей частотой 10 ГГц, рабочим расстоянием 180-190 мм, чувствительностью не хуже 26 дБ к сигналу имитатора на феррите марки НН400. Ранее проведенные испытания на разрывных машинах с предельным усилием 10-20 тонн, станке периодического нагружения для числа циклов приводящего к появлению трещин, продемонстрировали принципиальную возможность регистрации начала разрушения образцов стали как во время испытаний, так и после прекращения механического воздействия. Заключительные испытания подтвердили работоспособность метода, позволили получить новые, неизвестные ранее результаты по времени активности дефектов.

Обнаруженное явление, относящиеся к физике неразрушающего контроля металлов при воздействии внешних факторов (механическое нагружение, ультразвук, поле СВЧ) относится к слабо изученным, не имеющим строгой теоретической базы. Авторам не известны экспериментальные работы, связывающие условия механического нагружения при дополнительном воздействии ультразвука небольшой мощностью с

появлением в спектре отраженного СВЧ поля сигналов с частотой приложенного ультразвука. Практическое использование обнаруженного явления возможно при бесконтактном контроле деталей, узлов, имеющих скрытые дефекты (в виде трещин, отслоений, неплотностей прилегания), выполненных из металлов и сплавов

ЛИТЕРАТУРА

1. Костоглолов А.М., Попов А.В., Акустико-эмиссионный метод моделирования процессов разрушения материалов. Дефектоскопия, 2002, №10, с. 3-6
2. Васильев Б.В., Любошиц В.Л.. Теорема вириала и некоторые свойства электронного газа в металлах (Сессия РАН 23.02.1994 г.)/ Успехи Физических Наук/ 4,(164), 1994, С. 367-374
3. Трипалин А. С Буйло СИ. Акустическая эмиссия. Физикомеханические аспекты. Изд. Ростовского университета, 1996. 160 с.
4. Горбунов В.И., Суторихин В.А., Устинов Б.Ф.- №2372615, Патент на способ. Способ регистрации сигналов акустической эмиссии в металлах. Приоритет изобретения 22.июля 2008г.
5. Суторихин В.А., Устинов Б.Ф. №-81677. Патент на ПМ. Устройство для обнаружения активных дефектов в металлических изделиях. Приоритет изобретения 04.08.2008г.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ ПРУТКОВ И ТРУБ КОМБИНИРОВАННОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С РАЗНОЧАСТОТНЫМИ ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ КОМПОНЕНТАМИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Гольдштейн А.Е., Булгаков В.Ф., Крёнинг Х.-М.В.А.

Томского политехнического университета, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: algol@tpu.ru

Для дефектоскопии протяженных металлических изделий используются главным образом дефектоскопы с проходными дифференциальными и накладными вращающимися вихретоковыми преобразователями (ВТП).

Дефектоскопы с проходными ВТП наилучшим образом приспособлены к тяжелым условиям контроля непосредственно в технологическом потоке производства. Недостатками дефектоскопов с проходными преобразователями являются уменьшение абсолютной чувствительности к дефектам при увеличении диаметра контролируемого изделия, значительное изменение амплитуды сигнала от дефекта при поперечных смещениях контролируемого изделия, недостаточная достоверность обнаружения протяженных дефектов с малым градиентом свойств в продольном направлении (риск, царапин, трещин с округлым дном и незначительными перепадами по глубине). Два первых недостатка дефектоскопов с проходными ВТП могут быть сведены к минимуму использованием проходного многосекторного ВТП [1–3].

Вихретоковые дефектоскопы с накладными вращающимися преобразователями обеспечивают максимальную для вихретоковых средств контроля чувствительность к поверхностным продольным дефектам независимо от того резко или плавно изменяется их глубина в продольном направлении. Наиболее эффективно для обнаружения дефектов различных типов использование, как в дефектоскопе ВД-41П/2, комбинированных преобразователей с проходными и накладными вращающимися обмотками [4]. Недостатками дефектоскопов с накладными вращающимися преобразователями являются повышенные требования к кривизне и качеству поверхности контролируемых изделий, а также механическим устройствам для центрирования и механической стабилизации контролируемого изделия, невозможность в ряде случаев обеспечить приемлемого для цеховых условий зазора между преобразователем и контролируемым изделием.

Для обнаружения протяженных дефектов с малым градиентом свойств в продольном направлении в случае необходимости осуществления контроля в условиях значительных поперечных смещений контролируемого изделия

наиболее пригодными к таким условиям являются дефектоскопы, в которых используются накладные многосекторные ВТП с возбуждением разночастотных вихревых токов продольного направления. Как было показано в [5] преимуществами такого технического решения являются высокая чувствительность к протяженным дефектам при больших зазорах между поверхностью контролируемого изделия и обмотками ВТП, малая зависимость сигнала от дефекта от местоположения дефекта в зоне контроля и поперечного смещения изделия, качественная отстройка от влияния поперечных смещений даже при изменении электромагнитных свойств материала в допустимых для годного изделия пределах.

Использование для возбуждения вихревых токов в контролируемом изделии магнитного поля с разночастотными пространственными компонентами позволяет в одном ВТП объединить проходной многосекторный ВТП [3] и накладной многосекторный ВТП с возбуждением разночастотных вихревых токов продольного направления [5]. Достоинствами такого комбинированного ВТП являются высокая чувствительность как к локальным дефектам, так и протяженным дефектам с малым градиентом свойств в продольном направлении, возможность обеспечить высокую достоверность обнаружения различных по физической природе и геометрическим параметрам дефектов в условиях наличия значительных поперечных смещений контролируемых изделий и неоднородности электромагнитных свойств материала.

На рис. 1а приведена структурная схема дефектоскопа, реализующего предлагаемый метод контроля, а на рис. 1б – конструкция ВТП дефектоскопа. Для наглядности обмотки ВТП условно разнесены вдоль продольной оси Z, реально же все обмотки в продольном направлении совмещены.

Принцип работы дефектоскопа заключается в следующем. Генераторами 1, 2 и 3 вырабатываются гармонические напряжения с частотами ω_1 , ω_2 и ω_3 . Все генераторы синхронизируются схемой синхронизации 4, благодаря чему поддерживаются стабильными разности частот $\omega_2 - \omega_1 = \Delta\omega$ и $\omega_3 - \omega_1 = k \cdot \Delta\omega$.

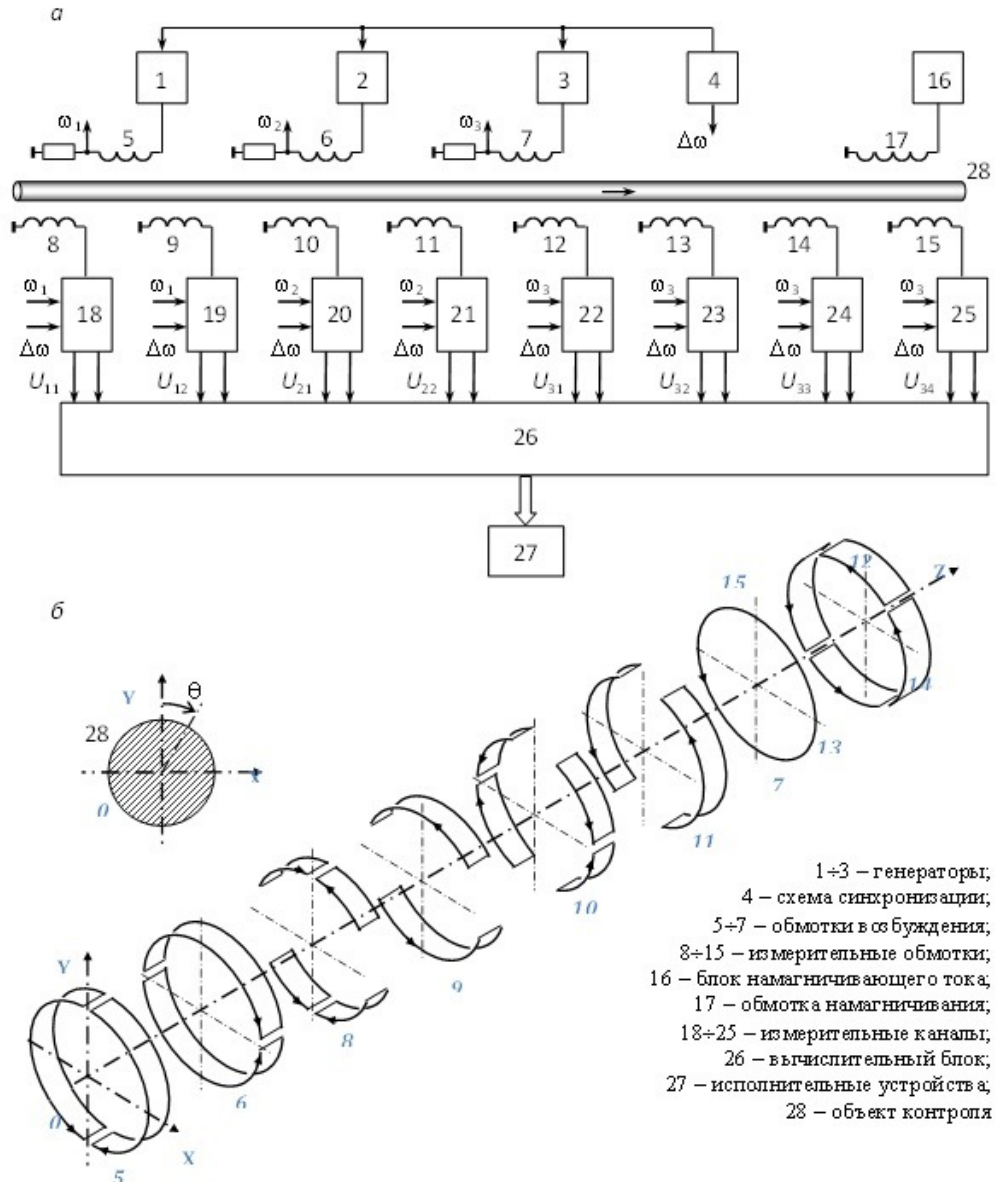


Рис. 1. Структурная схема (а) и конструкция ВТП (б) дефектоскопа

Здесь k – целое число. Частоты ω_1 , ω_2 и ω_3 отличаются от $\Delta\omega$ в целое число раз.

Выходные сигналы генераторов 1, 2 и 3 подаются на обмотки возбуждения ВТП 5, 6 и 7. Токи этих обмоток создают в зоне контроля ВТП магнитное поле с тремя гармоническими ортогональными пространственными составляющими частот ω_1 , ω_2 и ω_3 . Трехчастотное магнитное поле возбуждения наводит в контролируемом изделии вихревые токи трех частот. Двухсекционные обмотки накладного типа 5 и 6 используются для возбуждения в поверхностном слое контролируемого изделия вихревых токов продольного направления близких частот ω_1 и ω_2 , а обмотка проходного типа 7 – для возбуждения вихревых токов циркулярного направления частоты ω_3 . Следует отметить, что разность частот $\Delta\omega$ в данном случае, в отличие от

использования классических многочастотных ВТП, пренебрежимо мала с точки зрения результатов электродинамического взаимодействия магнитного поля и объекта контроля.

Для измерения составляющих поля вихревых токов частоты ω_1 используются четырехсекционная и двухсекционная измерительные обмотки 8 и 9, для измерения вихревых токов частоты ω_2 – четырехсекционная и двухсекционная измерительные обмотки 10 и 11, а для измерения составляющих поля вихревых токов частоты ω_3 – односекционные измерительные обмотки 12÷15.

ЭДС частоты измеряемого магнитного поля в измерительных обмотках появляются при нарушении симметрии наводимых в изделии вихревых токов в случае наличия дефекта,

радиального смещения (для обмоток 8÷11) либо перекоса (для обмоток 8÷15) контролируемого изделия относительно продольной оси ВТП. Для разделения этих воздействий используется амплитудно-фазовая обработка сигналов. Для этого в дефектоскопе имеются десять одинаковых измерительных каналов 18÷25, состоящих каждый из последовательно соединенных амплитудно-фазового детектора и интегрирующего дискретизатора. Каналы 18÷21 предназначены для выделения сигналов от протяженных дефектов, каналы 18 и 20 предназначены, кроме того, для выделения сигналов от поперечных смещений контролируемого изделия соответственно по осям Y и X , каналы 22÷25 предназначены для выделения сигналов от коротких дефектов.

Амплитудно-фазовым детектором осуществляется синхронное с соответствующей частотой управления ω_i детектирование напряжения измерительной обмотки ВТП, а интегрирующим дискретизатором – усреднение выходного сигнала амплитудно-фазового детектора за время $T = 2\pi/\Delta\omega$, задаваемое выходным сигналом схемы синхронизации 4. Схемотехнически интегрирующий дискретизатор состоит из последовательно соединенных схем аналогового интегратора и запоминающего устройства, охваченных общей отрицательной обратной связью, и представляет собой импульсный фильтр нижних частот с конечной импульсной характеристикой [5].

Амплитудно-частотная характеристика измерительного канала с опорной частотой ω_i имеет нули на частотах, отличающихся от ω_i на значения, кратные $\Delta\omega$. В результате такой обработки сигналов на выходах измерительных каналов 18 и 19 выделяются сигналы U_{11} , U_{12} , пропорциональные амплитудам комплексных составляющих вносимых напряжений соответственно четырехсекционной и двухсекционной измерительных обмоток 8 и 9 частоты ω_1 , на выходах измерительных каналов 20 и 21 выделяются сигналы U_{21} , U_{22} , пропорциональные амплитудам комплексных составляющих вносимых напряжений соответственно четырехсекционной и двухсекционной измерительных обмоток 10 и 11 частоты ω_2 , а на выходах измерительных каналов 22÷25 – сигналы U_{31} , U_{32} , U_{33} , U_{34} , пропорциональные амплитудам комплексных составляющих вносимых напряжений соответственно односекционных измерительных обмоток 12÷15 частоты ω_3 .

Качественное разделение сигналов, обусловленных каждой в отдельности составляющей магнитного поля, позволяет эффективно применить амплитудно-фазовую отстройку от влияния радиальных смещений и перекосов. В результате амплитудно-фазовой

отстройки мнимые составляющие выходных напряжений измерительных каналов дефектоскопа определяются главным образом наличием или отсутствием в контролируемой зоне дефектного участка изделия, а действительные составляющие – величиной поперечного смещения изделия относительно продольной оси ВТП.

Вычислительным блоком 26 осуществляется определение результирующих напряжений U_1 каналов измерения продольных составляющих вихревых токов частот ω_1 и ω_2 и U_2 каналов измерения циркулярных составляющих вихревых токов частоты ω_3 , а также сравнение этих напряжений с установленными пороговыми значениями.

Амплитуды сигналов от дефекта в каждом измерительном канале зависят не только от геометрии дефекта (глубины, раскрытия, ориентации), но и от азимута местоположения на поверхности изделия – угла θ (рис. 1б). Для независимости амплитуды суммарного сигнала от азимута протяженного дефекта в вычислительном блоке 26 по аналогии с [5] производится попарное алгебраическое суммирование, а затем векторное суммирование сигналов от дефектов измерительных каналов 18÷21:

$$U_1 = \sqrt{(\text{Im}\dot{U}_{11} + \text{Im}\dot{U}_{22})^2 + (\text{Im}\dot{U}_{12} + \text{Im}\dot{U}_{21})^2}. \quad (1)$$

Результирующий сигнал U_1 практически не зависит от азимута дефекта. Другой положительной особенностью такого алгоритма обработки сигналов ВТП является то, что в этом случае значительно ослабляется сигнал помехи, обусловленный возможным нарушением оптимального условия отстройки от смещения ввиду изменения электрофизических свойств контролируемого изделия и нарушения перпендикулярности направления отстройки и линии смещения. Физически такое ослабление влияния смещения объясняется тем, что при смещении изделия по оси OY сигнал возникает в измерительных обмотках 8 и 11, а при смещении по оси OX – в измерительных обмотках 9 и 10, причем в обоих случаях в противофазе. Вследствие этого, после суммирования продетектированных напряжений, сигналы от смещения в разных каналах взаимно компенсируются.

Для независимости амплитуды суммарного сигнала U_2 от азимута короткого дефекта, а также ослабления его зависимости от поперечных смещений контролируемого изделия в вычислительном блоке 26 по аналогии с [3] производится алгебраическое суммирование выходных сигналов от дефектов измерительных каналов 22÷25 с коэффициентами соответственно s_1 , s_2 , s_3 , s_4 , рассчитываемыми в зависимости от значений поперечных смещений изделия.

Исходными данными для определения корректирующих коэффициентов s_1 , s_2 , s_3 , s_4

являются зависимости от поперечных смещений x и y соответственно по осям OX и OY сигналов от дефектов измерительных каналов 22÷25 $\text{Im}U_{31}$, $\text{Im}U_{32}$, $\text{Im}U_{33}$, $\text{Im}U_{34}$ и сигналов от смещений измерительных каналов 18 и 20 $\text{Re}U_{11}$, $\text{Re}U_{21}$.

Зависимости от поперечного смещения y по оси OY сигналов от дефектов $\text{Im}U_{31}(y)$, $\text{Im}U_{32}(y)$ и сигнала от смещения $\text{Re}U_{11}(y)$ можно представить функциями

$$\begin{aligned} \text{Im}U_{31}(y) &= F_1(y)U_{N1}; \\ \text{Im}U_{32}(y) &= F_2(y)U_{N2}; \\ \text{Re}U_{11}(y) &= F_3(y). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь U_{N1} и U_{N2} – сигналы от дефекта при отсутствии смещения ($y = 0$); $F_1(y)$ и $F_2(y)$ – функции, описывающие зависимости от смещения сигналов от дефекта; $F_3(y)$ – функция описывающая зависимость от смещения сигнала от смещения.

С достаточной степенью точности функцию $F_3(y)$ можно считать линейной:

$$\text{Re}U_{11}(y) = t y, \quad (3)$$

где t – постоянный множитель.

Отсюда может быть определено значение величины смещения:

$$y = \frac{\text{Re}U_{11}}{t}. \quad (4)$$

С использованием вычисленного значения y могут быть определены независимые от смещения значения сигналов от дефекта:

$$U_{N1} = \frac{\text{Im}U_{31}}{F_1(y)} \text{ и } U_{N2} = \frac{\text{Im}U_{32}}{F_2(y)}. \quad (5)$$

И, таким образом, корректирующие коэффициенты

$$s_1 = \frac{1}{F_1(y)} \text{ и } s_2 = \frac{1}{F_2(y)}. \quad (6)$$

Аналогичным образом, с учетом одинакового характера зависимости сигналов от смещений x и y , находятся значение величины смещения x и корректирующие коэффициенты

$$s_3 = \frac{1}{F_1(x)} \text{ и } s_4 = \frac{1}{F_2(x)}. \quad (7)$$

Функциональные зависимости $F_1(y)$ и $F_2(y)$, а также значение множителя t определяются, как правило, экспериментально. Функции $F_1(y)$ и $F_2(y)$ задаются в вычислительном блоке 26 таблично либо аппроксимируются аналитическими выражениями. Результирующей сигнал U_2 каналов измерения циркулярных составляющих вихревых токов частоты ω_3

$U_2 = s_1 \text{Im}U_{31} + s_2 \text{Im}U_{32} + s_3 \text{Im}U_{33} + s_4 \text{Im}U_{34}$ (8) практически не зависит от азимута дефекта и мало зависит от поперечного смещения контролируемого изделия. Степень

неоднородности чувствительности к дефекту, обусловленная поперечными смещениями, благодаря описанному выше преобразованию уменьшается по сравнению с классическим проходным ВТП в восемь раз до приемлемого значения порядка 20%.

При превышении напряжениями U_1 и U_2 пороговых значений вычислительным блоком формируется сигнал управления исполнительными устройствами 27 (реле управления карманом брака, краскоотметчиком и т.п.)

Предлагаемый метод дефектоскопии был реализован в опытном образце дефектоскопа, предназначенного для контроля водопроводных труб на линиях контроля и непосредственно в производственном потоке трубопрокатных предприятий. В результате испытаний дефектоскопа на линии контроля ЧТПЗ (г. Челябинск) были определены следующие его технические характеристики:

- диаметр контролируемых труб от 10 до 50 мм;
- минимальные обнаруживаемые протяженные дефекты в виде продольной прорези длиной 40 мм, шириной 0,1 мм и глубиной 2,5 % от внешнего диаметра трубы;
- чувствительность к коротким дефектам соответствует стандарту DIN (Германия);
- максимальное поперечное смещение трубы ± 2 мм;
- длина неконтролируемых концов труб от 40 до 60 мм;
- скорость контроля до 4 м/сек.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полева А.А., Федосенко И.Ю. О вихрековой дефектоскопии с проходными преобразователями для поточного контроля труб и проката. – Заводская лаборатория. – 1998, т. 64, №1, с. 34–37.
2. Web-сайт ООО «Информационные системы». URL: <http://www.informsys.ru> (дата обращения: 25.04.2011).
3. Булгаков В.Ф. Уменьшение неравномерности чувствительности вихрековых преобразователей при радиальных смещениях контролируемых изделий. – Дефектоскопия, 1999, № 9, с. 3–8.
4. Web-сайт ЗАО «Спектр КСК. URL: <http://www.spektr-ksk.ru> (дата обращения: 04.05.2011).
5. Гольдштейн А.Е., Калганов С.А. Вихрековая дефектоскопия протяженных цилиндрических изделий с использованием возбуждения разночастотных пространственных компонент магнитного поля. – Дефектоскопия, 2000, № 5, с. 65–71.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ТРЕХМЕРНОЙ БЕСКОНТАКТНОЙ ПРОФИЛОМЕТРИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКОЙ

Ковалевская Ж.Г., Уваркин П.В.* , Толмачев А.И. *

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

634021, Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4

E-mail: kovalevskaya@ispms.tsc.ru

Поверхностные слои – наиболее активные области конструкционных и инструментальных материалов, принимающие участие в обмене энергией и веществом с окружающей средой. Это приводит к их более ранней повреждаемости по сравнению с глубинными слоями. В большинстве случаев работоспособность деталей машин, аппаратов, оборудования и элементов конструкций зависит не столько от качества металла всего сечения, сколько от свойств поверхностных слоев [1-2].

Поверхностная прочность не может быть прямо связана со свойствами исходного материала, и зависит от вторичных структур, образующихся на поверхности исходного материала путем его структурной перестройки. Направленное изменение строения поверхностного слоя за счет внешних воздействий называется модифицированием поверхности.

Существует много методов модифицирования поверхности. Достичь эффективной обработки поверхности детали при уменьшении силового воздействия позволяет использование поверхностного пластического деформирования с использованием энергии ультразвуковых колебаний, оказывающих существенное влияние на характер контактного взаимодействия инструмента и поверхности детали. При использовании ультразвукового воздействия на инструмент обеспечивается существенное уменьшение трения и увеличение пластичности в очаге деформации, что обуславливает сглаживание шероховатости течения, способствует глубокой пластической и упругопластической проработке поверхностного слоя, созданию благоприятных сжимающих напряжений.

Ультразвуковая финишная обработка (УФО) не только модифицирует структуру поверхностного слоя, но и формирует на поверхности детали благоприятный микрорельеф. Например, микрорельеф поверхности тела вращения формируется наложением друг на друга канавок, оставляемых на поверхности детали деформирующим инструментом с учетом искажений, вызываемых пластическим течением металла от каждого отдельного удара инструмента. Формирование подобного микрорельефа повышает эксплуатационные характеристики готового изделия и, в первую очередь, усталостную прочность [3-4].

Не все режимы УФО обеспечивают полное деформирование исходной шероховатости и формирование нового регулярного микрорельефа поверхности детали. Если УФО проходит с частичным сглаживанием неровностей поверхности, то она может быть отнесена к отделочно-упрочняющей обработке (ОУО), если происходит полное сглаживание исходной шероховатости – к упрочняющей обработке (УО). Данная классификация режимов ППД в зависимости от соотношения глубины внедрения инструмента и исходных параметров шероховатости представлена в работах А.Г. Суслова [1].

Оценить, описать и классифицировать состояние поверхностного слоя детали в этом случае корректнее всего с использованием визуального метода анализа поверхности изделия трехмерным бесконтактным профилометром Micro Measure 3D Station. Профилометр производит измерения различных глубин на поверхности предмета с использованием набора компактных оптических датчиков. Выбор трех осей движения дает возможность проводить точное позиционирование и сканирование поверхности образца или готовой детали. Программное обеспечение управляет процессом сканирования образца, записью данных, их математической и графической обработкой. Благодаря небольшому размеру светового пятна прибор с большой точностью определяет все параметры состояния поверхности, производит расчет расстояний, площадей, объемов отдельных элементов поверхности. Размер зоны сканирования составляет 100 мм², глубина сканирования – 50 мм, минимальный размер шага в двух направлениях – 0,1 мкм.

Основные задачи работы заключались в следующем: разработка системы контроля качества поверхности деталей после УФО с помощью трехмерного бесконтактного профилометра Micro Measure 3D Station; исследование влияния параметров УФО и введения в зону обработки геоактивирующих материалов на формирование микрорельефа получаемой поверхности; разработка рекомендаций по условиям проведения УФО в режиме УО и ОУО.

УФО образцов была проведена в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН [5]. Для этого использовался технологический

комплект УЗГК-02 состоящий из ультразвукового генератора УЗГ-02/22 и инструмента – магнитостриктора с закрепленным твердосплавным индентором в виде полусферы с радиусом закругления 5 мм. Главные технические характеристики комплекса: потребляемая мощность 220 Вт, частота 50 Гц, амплитуда колебания 5-10 мкм, усилие прижима 75 Н.

Ультразвуковую обработку проводили на поверхностях образцов из малоуглеродистых и среднеуглеродистых сталей, полученных чистовым и получистовым точением.

С помощью профилометра Micro Measure 3D Station были получены следующие данные о микрорельефе получаемых поверхностей: оптическое изображение поверхности, трехмерное изображение поверхности, изображение профиля поверхности, расчетные данные параметров шероховатости.

Рассмотрим характер формирования микрорельефа поверхности углеродистой стали при УФО. Результаты исследования показывают, что важнейшую роль в формировании микрорельефа поверхности стали при УФО играет высота выступов исходной шероховатости поверхности. При формировании поверхности резания с большой шероховатостью, УФО на выбранных режимах не всегда обеспечивает полное выглаживание исходного профиля поверхности (рис. 1).

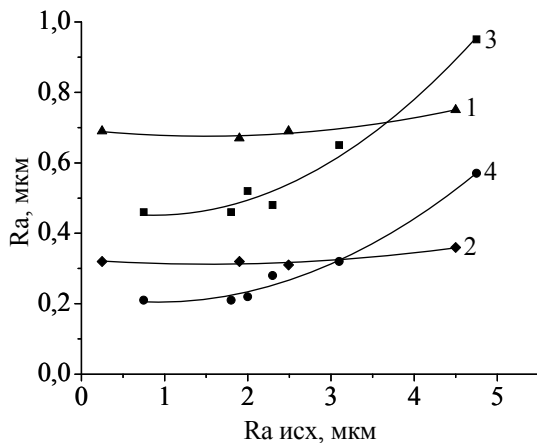


Рис. 1. Зависимость шероховатости поверхности стали после УФО от исходной шероховатости поверхности: 1 – сталь 20, S = 0,2 мм/об; 2 – сталь 20, S = 0,05 мм/об; 3 – сталь 60, S = 0,2 мм/об; 4 – сталь 60, S = 0,05 мм/об (S – скорость подачи при УФО)

Из графиков на рис. 1 видно, что для стали 20 полное выглаживание возможно на поверхности с исходной шероховатостью Ra не более 4,5 мкм, что соответствует по Rz около 25 мкм. При этом уменьшение шага подачи ультразвукового инструмента с 0,2 мм/об до 0,05 мм/об не меняет характер формирования новой поверхности.

Увеличение количество углерода в стали до 0,6 % (сталь 60) и, как следствие, повышение ее твердости, снижает допустимое значение исходной шероховатости поверхности до 2,7 мкм по Ra, что по Rz составляет около 18 мкм. В этом случае УФО поверхности обеспечивает УО без следов точения.

Выше перечисленные значения шероховатости поверхности точения в интервале до 20 мкм по Rz, относят данное точение к чистовому. Значит, при чистовом точении поверхности конструкционных углеродистых сталей УФО выглаживает поверхность полностью и может считаться УО.

При ультразвуковой обработке поверхности с большей шероховатостью происходит лишь частичная деформация выступов исходного микрорельефа, что приводит к повышению шероховатости получаемой поверхности и частичному сохранению исходного микрорельефа.

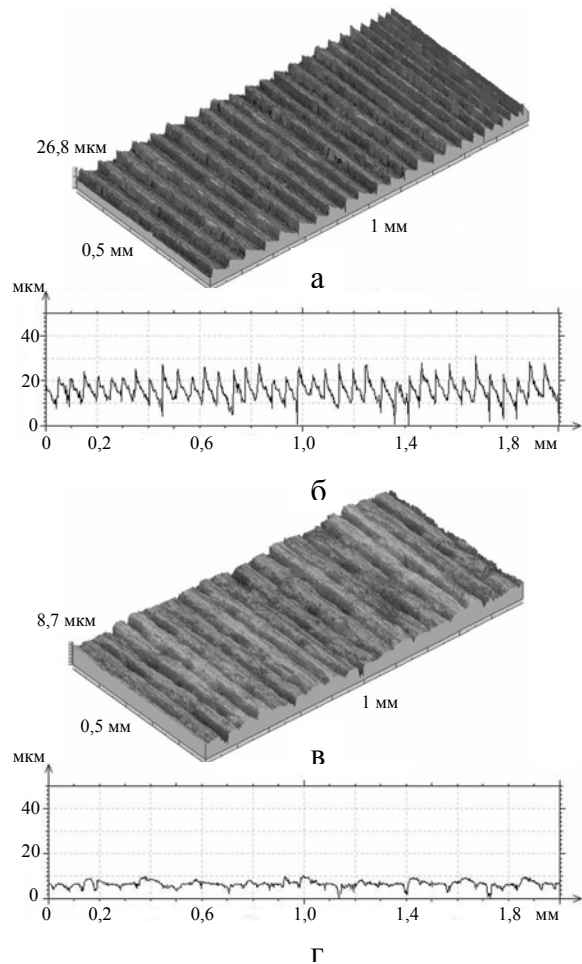


Рис. 2. Трехмерное изображение (а, в) и профилограмма поверхности (б, г) стали 60 после точения (а, б) и УФО в режиме ОУО с частичным сохранением впадин точения (в, г)

В зависимости от режимов и состояния поверхности точения, УФО в режиме ОУО может по-разному изменять микропрофиль исходной

поверхности. Первый вид формируемой поверхности можно назвать поверхность с частичным сохранением впадин точения (рис.2).

Данный вид поверхности формируется при шаге подачи режущего инструмента до 0,25 мм/об. В этом случае увеличение высоты выступов поверхности точения приводит к тому, что при УФО ультразвуковой инструмент, совершая амплитудное движение, не проникает в материал на требуемую глубину, происходит смятие выступов шероховатости лишь на часть их высоты и исходный микрорельеф поверхности остается частично не выглаженным.

Как видно на рисунке 2, ультразвуковой инструмент деформировал вершины точения, не загладив впадины. На выглаженных участках поверхности сформировался характерный для УФО микрорельеф, а впадины сохранили строение, характерное для поверхности точения (рис. 2в,г). Надо отметить, что на оставшиеся от точения макродефекты в виде не полностью деформированных впадин шероховатости воздействуют остаточные напряжения сжатия, затрудняя их развитие в трещины в процессе работы детали. Это благоприятно сказывается на эксплуатационных свойствах готового изделия [2]. Несмотря на это, при выборе режимов предварительного точения желательнее задавать высоту формируемой микронеровности, обеспечивающей УФО в режиме ОУ и избегать формирования поверхности с частичным сохранением впадин точения.

Второй вид поверхности, получаемой ультразвуковой обработкой в режиме ОУО, формируется при увеличении шага подачи режущего инструмента более 0,25 мм/об. Этот вид поверхности можно назвать поверхность с частичным сохранением выступов точения. В этом случае, ультразвуковой инструмент, перемещаясь по поверхности точения и деформируя поверхностный слой, заглаживает субмикрощероховатость, острые кромки впадин и вершин, и лишь частично деформирует сами выступы шероховатости поверхности.

На рис. 3а представлена профилограмма поверхности стали 45 полученной точением со средним шагом неровностей по вершинам 0,5 мм и шероховатостью по Rz 25,6 мкм. После УФО с назначенной мощностью ультразвукового генератора 150 Вт, на получаемой поверхности частично сохраняются выступы точения (рис. 3б). В этом случае, новый микропрофиль, формирующийся на поверхности от ударов ультразвукового инструмента, задает субмикрощероховатость поверхности, а сглаженный профиль точения определяет параметры шероховатости.

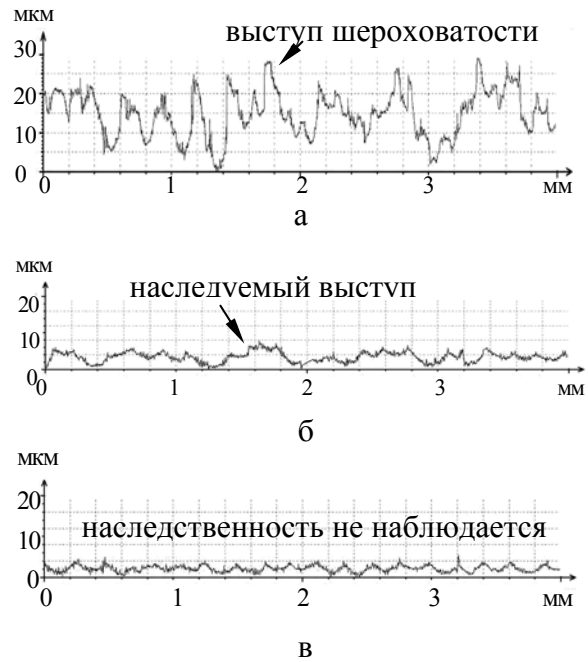


Рис. 3. Профилограммы поверхности стали 45 после точения (а) и УФО с мощностью генератора: 150 Вт (б); 250 Вт (в)

Детали, обработанные УФО в режиме ОУО с частичным сохранением выступов точения, не имеют на поверхности опасных острых рисок и углублений и поэтому должны иметь высокие характеристики усталостной прочности. Однако сохраняющаяся неоднородность микрорельефа поверхности может ухудшать триботехнические характеристики готового изделия.

Обычно увеличение глубины проработки поверхности точения при УФО осуществляют за счет увеличения мощности ультразвукового генератора. Увеличение мощности генератора приводит к увеличению амплитуды колебания ультразвукового инструмента и, как следствие, внедрению инструмента в обрабатываемый материал на большую глубину. Так, на рис. 3в показано, что увеличение мощности ультразвукового генератора до 250 Вт приводит к полному устранению следов технологической наследственности на поверхности стали 45.

Увеличение глубины проработки поверхности за счет изменения мощности ультразвукового генератора сказывается на состоянии поверхности стали неоднозначно. Чем больше глубина внедрения индентора, тем выше степень пластической деформации поверхностных слоев, что может привести к перенаклепу.

Другим технологическим приемом полного выглаживания поверхности при УФО является увеличение проходов ультразвукового инструмента по поверхности детали. За счет повторного и последующих воздействий на поверхность индентора происходит полное

заглаживание сохранившихся на поверхности дефектов точения, что приводит к снижению значения шероховатости поверхности.

Данный технологический подход обычно используют на деталях из малоуглеродистых сталей, обладающих высокой пластичностью. На сталях с высоким содержанием углерода увеличение количества проходов УФО приводит к перенаклепу поверхностного слоя. Так на рис. 4 показано, как выглядит поверхность стали 60 после пяти проходов ультразвукового инструмента. Поверхность покрыта частично отделившимися чешуйками перенаклепанного материала.

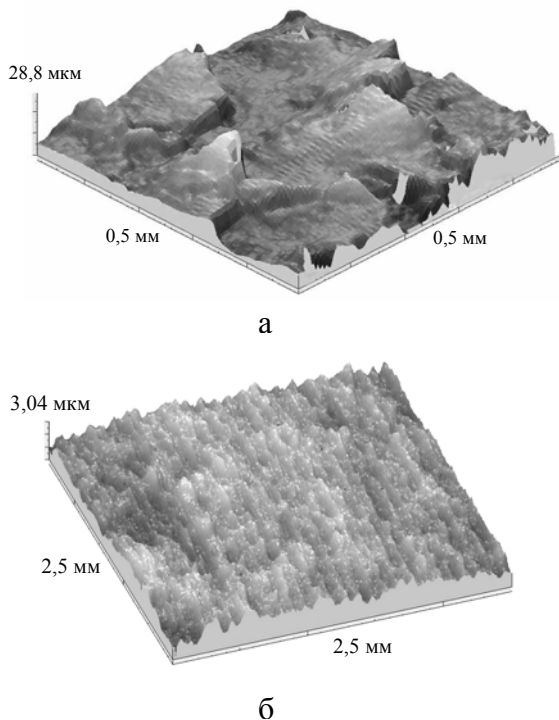


Рис. 4. Трехмерное изображение поверхности стали 45 после пяти проходов инструмента: а – в обычном режиме; б – с введением в зону обработки геоактивирующего материала

За счет формирования чашучатого строения поверхностного слоя стали, значения шероховатости с увеличением количества проходов инструмента значительно возрастает.

Решить проблему перенаклепа поверхности можно введением в зону обработки геоактивирующего материала серпентина – природного минерала из группы магнево-железистых гидросиликатов. В работе были подобраны режимы ультразвуковой обработки поверхности стали 60 с введением в зону деформации геоактивирующего материала. Были составлены следующие смеси. Связующая составляющая – 70% веретенного масла и 30% канифоли. Геоактивирующий материал – серпентин. Смесь готовилась в соотношении связующей составляющей и серпентина от 9:1 до

1:9. Оптимальной принята смесь: 80% серпентина и 20% связующей. При большем содержании связующей составляющей смесь излишне жидкая, а при меньшем содержании происходит налипание материала на обрабатываемую поверхность инструмента.

Результаты исследования микрорельефа полученных поверхностных слоев стали и количественная оценка значений шероховатости показали, что введение в зону деформации геоактивирующего материала меняет условия взаимодействия индентора и обрабатываемой поверхности, увеличивая количество допускаемых проходов инструмента с обычного 1..2 до 5 без перенаклепа. Получаемая поверхность имеет однородный микрорельеф характерный для ультразвуковой обработки в режиме УО (рис. 4б).

На рисунке 5 показано как меняются значения шероховатости поверхности стали с увеличением количества проходов инструмента при введении в зону обработки геоактивирующего материала.

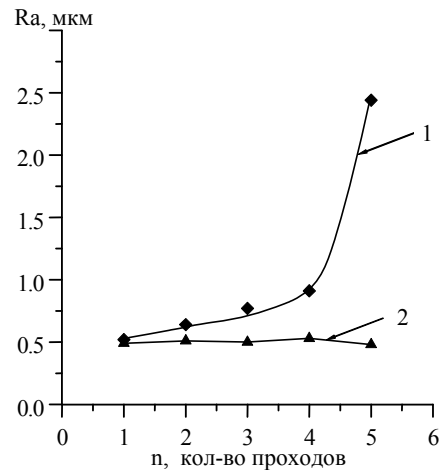


Рис. 5. Зависимость шероховатости поверхности стали от количества проходов инструмента при УФО: 1 – обработка поверхности в обычном режиме; 2 – обработка поверхности с геоактивирующим материалом

Как видно из графиков, при введении в зону УФО геоактивирующего материала меняются условия взаимодействия индентора и поверхностного слоя детали. При увеличении количества проходов инструмента шероховатость поверхности снижается.

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Метод трехмерной бесконтактной профилометрии поверхности обеспечивает качественную визуализацию поверхности изделия и количественную оценку всех характеристик микрогеометрии поверхности, что значительно повышает эффективность исследований.

2. В зависимости от режимов и состояния поверхности точения, УФО в режиме отделочно-упрочняющей обработки может формировать

микропрофиль исходной поверхности двух видов: с частичным сохранением впадин точения или с частичным сохранением выступов точения.

3. При чистовом точении поверхности конструкционных углеродистых сталей, УФО выглаживает поверхность полностью и может считаться упрочняющей обработкой.

4. УФО поверхности точения в высокой шероховатостью может обеспечить полное выглаживание поверхности без перенаклепа, если использовать многопроходную обработки с введением в зону взаимодействия индентора и поверхности детали геоактивирующего материала.

Авторы выражают благодарность сотруднику Центра измерений свойств материалов Томского политехнического университета И.А. Шулепову за помощь в проведении работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инженерия поверхности деталей / Под ред. Сулова А.Г. – М.: Машиностроение, 2008. – 318 с.

2. Сулов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.

3. Абрамов. О.В. Ультразвуковая обработка материалов. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.

4. Марков А. И. Ультразвуковая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1980. – 237 с.

5. Клименов В.А., Ковалевская Ж.Г., Уваркин П.В., Белявская О.А., Толмачев А.И. Ультразвуковая поверхностная обработка – метод повышения ресурса работы бандажей колес локомотивов // Тяжелое машиностроение – 2009. – №12. – С.24-28.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ (НА ПРИМЕРЕ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ)

Свинолупов Ю.Г., Корнев В. А., Кулешов В.К.

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: sjg@manotom-tmz.ru

Методология и проблематика оценки уровня качества объектов любой природы освещается в квалиметрии – науке о количественной оценке качества [1]. Нами была сделана попытка использования методов квалиметрии для оценки качества измерительных приборов на примере датчиков давления (ИПД) основных отечественных и зарубежных производителей.

Под качеством согласно определению государственных стандартов [2] (а также международного стандарта ИСО 8402) понимается совокупность свойств изделия, обуславливающих его пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с его назначением.

Под *уровнем качества* изделия понимаются относительные характеристики качества (или его обобщенная характеристика) по сравнению с совокупностью базовых показателей, в качестве которых используются показатели перспективных образцов, аналогов и стандартов. Под аналогом подразумевается образец серийного производства устройства, принцип действия, функциональное назначение, масштабы производства и условия, применения которого те же, что и у проектируемого (оцениваемого) изделия. Количественные характеристики одного или нескольких свойств называют показателями качества.

Основными методами оценки уровня качества являются дифференциальный и комплексный [3,4]. Дифференциальный метод оценки качества изделия основан на сравнении характеристик исследуемого изделия с соответствующими характеристиками аналога. Естественно, валидность оценки зависит от правильности выбора аналога. При этом выбирают аналог, наиболее близкий по функциональному назначению. Оценка уровня качества разрабатываемых изделий производится на основе сравнения основных групп технико-эксплуатационных параметров.

Дифференциальный метод оперирует отношением сравниваемых показателей.

$$K_i = P_{i\phi} / P_{i\delta}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где K_i – значение i -го показателя качества изделия; $P_{i\phi}$ – фактический единичный показатель качества изделия; $P_{i\delta}$ – базовое значение i -го единичного показателя. При этом сравнивают относительные единичные показатели качества по отдельности.

Использование дифференциального метода оценки требует предварительного определения

прибора-лидера, сам же метод не позволяет однозначно оценить уровень качества совокупности образцов и выявить лидера. Для оценки уровня качества приборов применен комплексный метод, заключающийся в расчете для каждого образца обобщенного показателя, который функционально зависим от исходных относительных показателей:

$$K = F(g_i, a_i), \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где g_i – i -й относительный показатель качества; a_i – его весовой коэффициент.

В различных источниках показано, что при определении комплексной оценки качества применяются различные средневзвешенные зависимости – математические модели (целевые функции) сплошного свойства «качество», причем наибольшее распространение получили следующие оценки:

средневзвешенная арифметическая

$$K = \sum_{i=1}^n a_i g_i \quad (3)$$

средневзвешенная геометрическая

$$K = \prod_{i=1}^n (g_i)^{a_i} \quad (4)$$

средневзвешенная гармоническая

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{g_i}}, \quad (5)$$

средневзвешенные квадратическая

$$K = \sum_{i=1}^n a_i g_i^2, \quad (6)$$

$$K = 1 - \sqrt{\sum_{i=1}^n a_i (1 - g_i)^2} \quad (7)$$

Аддитивная форма (средневзвешенное суммирование) наиболее распространена, хотя ее недостатком [5] является возможность "компенсации" уровня качества по одним параметрам за счет других. Кроме того, она допускает ситуацию значимости интегрального показателя качества при нулевом значении одного или нескольких параметров. В этом смысле мультипликативная форма представления предпочтительнее, хотя следует отметить, что она легко преобразуется в аддитивную простым логарифмированием.

Отличие разработанной методики от существующих состоит в следующем: во-первых, в качестве базовых показателей качества предложено использовать лучшие показатели среди совокупности участвующих в оценке приборов, а не показатели конкретного перспективного образца (определенного каким-либо образом предварительно), во-вторых, в связи с тем, что форма представления обобщенного показателя качества не может быть однозначно обоснована, предложено оценивать комплексные показатели качества, используя все пять средневзвешенных зависимостей, ранг приборов рассчитывать при использовании каждой из пяти зависимостей (3-7), а окончательный ранг приборов рассчитывать как среднее арифметическое пяти рассчитанных значений рангов.

Методика оценки качества ИПД состоит из следующих этапов:

1. Составление первоначального списка показателей.

2. Согласование экспертами списка показателей и определение номенклатуры единичных показателей, по которой следует проводить оценку качества.

3. Ранжирование и определение коэффициентов весомостей единичных показателей качества.

4. Определение значений базовых единичных показателей качества.

5. Определение значений единичных показателей качества оцениваемых образцов.

6. Определение относительных единичных показателей оцениваемых образцов.

7. Расчет комплексного показателя рассматриваемых образцов.

8. Ранжирование приборов по уровню качества, определение лидера.

Составление первоначального списка показателей

В соответствии с государственными стандартами оценки качества изделий [6 – 8] выделяют следующие группы показателей: функциональные, эксплуатационные, показатели надежности, экономические, эргономические, эстетические и патентно-правовые. В таблице 1. приведен составленный первоначальный список показателей качества ИПД по группам.

Таблица 1

Первоначальный список показателей качества

Группы показателей		Отдельные показатели групп
Вид	Существующая характеристика	
1. Функциональные показатели	Характеризуют свойства ИПД, проявляющиеся непосредственно в процессе функционирования	P1- основная погрешность; P2- дополнительная температурная погрешность; P3- диапазон перестройки предела; P4- тип выходного аналогового сигнала; P5- тип выходного цифрового сигнала; P6- диапазон напряжения питания; P7- потребляемая мощность; P8- наличие индикатора; P9- наличие сигнализирующего устройства; P10- диапазоны измеряемого давления; P11- возможность коррекции временного дрейфа.
2. Показатели надежности	Определяют меру обеспечения длительности использования и необходимых условий работы и жизнедеятельности человека	P12- безотказность; P13- долговечность; P14- сохраняемость.
3. Эксплуатационные показатели	Характеризуют приспособленность ИПД к эксплуатации	P15- габаритные размеры корпуса; P16- масса датчика; P17- степень защиты корпуса; P18- диапазон температур окружающей среды; P19- диапазон температур измеряемой среды; P20- коррозионная стойкость; P21- устойчивость к воздействию агрессивных сред.
4. Экономические показатели	Отражают меру экономической выгоды производства ИПД и приобретения потребителем	P22- цена датчика давления

5. Эргономические показатели	Очерчивают соответствие технико-эксплуатационных параметров изделия антропометрическим, физиологическим и психологическим требованиям потребителя	P23- удобство управлять рабочими органами
6. Эстетические показатели	Определяют эстетические свойства (дизайн) ИПД	P24- выразительность и оригинальность формы; P25- цветное оформление; P26- эстетичность тары(упаковки).
7. Патентно-правовые показатели	Отражают меру использования новых находок при проектировании ИПД	P27- коэффициент патентной защиты P28- коэффициент патентной чистоты

Определение системы (номенклатуры) единичных показателей

Экспертная группа, включающая ведущих в области датчиков и измерительной аппаратуры специалистов, проанализировав указанный список, исключила менее значимые показатели P7, P9, P10, P11, P20, P21-P28, объединив P12, P13, P14 в качестве единого показателя надежности. В отношении последнего возникли следующие противоречия: отечественные производители в качестве показателей надежности указывают средний срок службы датчика в годах и среднюю наработку на отказ в часах и не указывают долговременную стабильность, зарубежные производители указывают стабильность в % за год, полгода или несколько лет. Одно из требований, предъявляемых к показателям качества: они должны быть определены для всех приборов данной номенклатурной группы. Исходя из задачи ранжирования комплексных показателей качества всех зарубежных и отечественных датчиков, в качестве показателя надежности было предложено использовать долговременную стабильность, причем для зарубежных датчиков этот показатель определен, а для отечественных датчиков в качестве долговременной стабильности (не указанной в явном виде) - использовать предельно допустимое значение основной погрешности за межповерочный интервал. Самым спорным оказался вопрос включения в номенклатуру показателей цены датчиков. Несомненно, что при выборе датчика давления очень важным является соотношение цена/качество, и включение цены как одного из единичных показателей качества, на первый взгляд, не должен вызывать сомнений. Но при практическом составлении таблиц единичных абсолютных показателей качества датчиков давления оказалось, что определять технические характеристики датчиков давления относительно просто – они везде однозначно определены и неизменны. По-другому обстоит дело с

экономическими показателями. Цена на датчики давления, в первую очередь зарубежных производителей, варьируется в широком диапазоне - может отличаться в 1,5, 2 и 2,5 раза в зависимости от поставщика. Использовать цену, предлагаемую изготовителем, также является некорректным, поскольку цена датчик в 500\$ в США оказывается существенно иной в России. В результате включение цены в номенклатуру единичных показателей приведет к существенному искажению результатов анализа из-за неоднозначности определения количественного значения цены, приведенной к одним и тем же условиям. Уже само понятие «цена/качество» разграничивает цену и качество, т.е. качество оцениваемых приборов определяется техническими, функциональными и т.д. характеристиками и не зависит от цены прибора (изменение цены никак не повлияет на характеристики прибора), но цена является одним из главных критериев при выборе того или иного прибора. Поэтому нам представляется целесообразным разделить квалитетический анализ на анализ качества и анализ предпочтительности выбора. Анализ качества сам по себе имеет большую ценность, так как проводится на основании объективных и однозначно определенных характеристик датчиков давления, анализ предпочтительности выбора конкретный момент времени, когда выбирают датчик, и места, поскольку цена меняется в зависимости от места и времени. Таким образом, преследуя цель получения объективного анализа качества современных датчиков давления, было принято решение анализ строить на строго и однозначно определенных показателях – технических характеристиках датчиков, не включая экономические показатели – цену датчиков.

В таблице 2 представлена окончательно определенная номенклатура единичных показателей качества.

Таблица 2

Номенклатура единичных показателей качества датчиков давления

Единичные показатели качества	
P1 – основная погрешность	P7 – диапазон напряжения питания
P2 – дополнительная температурная погрешность	P8 – наличие индикатора
P3 – диапазон перестройки предела	P9 – габаритные размеры корпуса
P4 – долговременная стабильность	P10 – масса датчика
P5 – тип выходного аналогового сигнала	P11 – степень защиты корпуса
P6 – тип выходного цифрового сигнала	P12 – диапазон температур окружающей среды
	P13 – диапазон температур измеряемой среды

Ранжирование и определение коэффициентов весомостей единичных показателей качества

Для ранжирования показателей качества применили метод попарного сопоставления [1]. Суть метода заключается в следующем. Каждому эксперту вручают таблицу, в которой по вертикали и по горизонтали указаны номера соответствующих показателей P1, P2, ..., Pn. Каждый эксперт последовательно сравнивает показатель P1 с показателями P2, P3, ..., Pn. Если эксперт считает, что показатель P1 предпочтительнее показателя Pi, то в первой строке в i-том столбце он ставит единицу ($\delta 1i = 1$), в противном случае $\delta 1i = 0$. Затем эксперт последовательно сравнивает показатель P2 с показателями P3, P4, ..., Pn. Аналогичные операции эксперт производит последовательно с показателями P3, P4, ..., Pn. Таким образом, заполняют правый верхний угол таблицы. Левый нижний угол заполняют противоположными цифрами. При обработке результатов опроса экспертов значения, полученные в каждой строчке, суммируются:

$$Si = \sum_j^n \delta_{ij} \quad (8)$$

Показателю, имеющему минимальное значение Si , присваивается ранг $r_{1j}=1$, следующему по значению показателю - ранг $r_{2j}=2$ и т.д.

Оценка i-го коэффициента весомости определяется как

$$a_i = \frac{\sum_j^N r_{ij}}{\sum_i^n \sum_{j=1}^N r_{ij}}, \quad (9)$$

где n-количество показателей; N-число экспертов.

В таблице 3 приведены результаты ранжирования показателей качества датчиков давления и весовые коэффициенты единичных показателей.

Таблица 3

Ранги и весовые коэффициенты единичных показателей

Показатель	Ранг r_i	Вес a_i
P4- долговременная стабильность	13	0,143
P1- основная погрешность	12	0,132
P5- наличие выходного аналогового сигнала	11	0,121
P3- диапазон перестройки предела	10	0,110
P2- дополнительная температурная погрешность	9	0,099
P6- наличие выходного цифрового сигнала	8	0,088
P8- наличие индикатора	7	0,077
P7- диапазон напряжения питания	6	0,066
P11- степень защиты корпуса	5	0,055
P13- диапазон температур измеряемой среды	4	0,044
P12- диапазон температур окружающей среды	3	0,033
P9- габаритные размеры корпуса	2	0,022
P10- масса датчика	1	0,011

Определение значений базовых единичных показателей качества

Оценки единичных относительных показателей качества вычислим по формулам

$$g_{ij} = \frac{P_{ij}}{P_{in}} \quad (10), \quad \text{или}$$

$$g_{ij} = \frac{P_{in}}{P_{ij}}, \quad (11)$$

где P_{ij} – i -ый абсолютный показатель j -го образца;
 P_{in} – наилучшее значение i -го показателя качества среди рассматриваемых образцов (датчиков),
 $i = \overline{1, n}$, $i = \overline{1, m}$; n – число единичных показателей; m – число рассматриваемых образцов. Если увеличение относительного показателя отражает повышение качества датчика, используем формулу (10). И, напротив, если показатель снижает качество, то выбираем формулу (11).

В таблице 4. сведены выбранные базовые показатели качества. *Примечание. Относительный показатель качества «габаритные размеры» вычисляются как отношение объемов приборов. За базовый показатель было выбрано наименьшее значение объема датчика среди всех рассматриваемых приборов. В таблице 5 приведены значения усредненных по совокупности рассматриваемых приборов показатели качества.

Таблица 4

Выбор базовых единичных показателей качества датчиков давления

Единичный показатель 1	Значение базового показателя 2	Принадлежность ИПД 3	Отн. показатель 4
P1- основная погрешность	$P_{1n} = 0,02\%$	датчик RPT 200 SMART фирмы DRUCK, Англия	$g_{1j} = \frac{0,02}{P_{1j}}$
P2- дополнительная температурная погрешность;	$P_{2n} = 0,01\%/10\text{ }^\circ\text{C}$	датчик DMP331i фирмы BD Sensors, Германия и Чехия	$g_{2j} = \frac{0,01}{P_{2j}}$
P3- диапазон перестройки предела	$P_{3n} = 200$ (200:1)	датчик 3051S фирмы ROSEMOUNT Inc, Германия	$g_{3j} = \frac{P_{3j}}{200}$
P4- долговременная стабильность	$P_{4n} = 0.01\%/год$	датчик RPT410 фирмы DRUCK, Англия	$g_{4j} = \frac{0.01}{P_{4j}}$
P5- наличие выходного аналогового сигнала	Ток Напряжение Отсутствует	-	$g_{6j} = 1$ $g_{6j} = 0.9$ $g_{6j} = 0.5$
P6- наличие выходного цифрового сигнала	HART CAN RS-485 RS-232 Частотный выход отсутствует	-	$g_{6j} = 1$ $g_{6j} = 0.9$ $g_{6j} = 0.8$ $g_{6j} = 0.7$ $g_{6j} = 0.6$ $g_{6j} = 0.5$
P7- диапазон напряжения питания	$P_{7n} = 55\text{ В}$	датчик 1151 фирмы ROSEMOUNT Inc, Германия	$g_{7j} = \frac{P_{7j}}{55}$
P8- наличие индикатора	Светодиодный Жидкокристаллический Отсутствует	-	$g_{8j} = 1$ $g_{8j} = 0,9$ $g_{8j} = 0,5$
P9- габаритные размеры корпуса*	$P_{9n} = 21708\text{ мм}^3$	67x18x18, датчик PTX300 фирмы DRUCK, Англия	$g_{9j} = \frac{21708}{P_{10j}}$
P10- масса датчика	$P_{10n} = 0,057\text{ кг}$	датчик серии ML фирмы Honeywell, США	$g_{10j} = \frac{0,057}{P_{11j}}$
P11- степень защиты корпуса	IP65-IP68 IP54 -IP55 IP40- IP53	-	$g_{11j} = 1$ $g_{11j} = 0,9$ $g_{11j} = 0,5$
P12- диапазон температур окружающей среды	$P_{12n} = 180^\circ\text{C}$	(-55...+125 $^\circ\text{C}$, датчик PMP317 фирмы DRUCK, Англия	$g_{12j} = \frac{P_{13j}}{180}$
P13- диапазон температур измеряемой среды	$P_{13n} = 340^\circ\text{C}$	+10...+350 $^\circ\text{C}$, датчик МИДА-ДИ-12П фирмы ЗАО МИДАУС, г.Ульяновск	$g_{13j} = \frac{P_{14j}}{340}$

Таблица 5

Значения усредненных по совокупности рассматриваемых приборов показателей качества

Единичный показатель P_i	Значение усредненного показателя P_i ср
1	2
P1- основная погрешность, %	0,279
P2- дополнительная температурная погрешность, %/10°C	0,237
P3- диапазон перестройки предела	17,3
P4- долговременная стабильность, %/год	0,246
P5- наличие выходного аналогового сигнала (см. табл.1.5)	0,958
P6- наличие выходного цифрового сигнала (см. табл.1.5)	0,685
P7- диапазон напряжения питания	23,6
P8- наличие индикатора (см. табл.1.5)	0,608
P9- габаритные размеры корпуса, мм ³ (объем)	1231056
P10- масса датчика, кг	1,21
P11- степень защиты корпуса (см. табл.1.5)	0,969
P12- диапазон температур окружающей среды, °C	107
P13- диапазон температур измеряемой среды, °C	144

Определение значений единичных показателей качества оцениваемых образцов

Исходные абсолютные показатели качества, относительные показатели качества рассматриваемых образцов, значения комплексных показателей качества, рассчитанные по формулам (3)-(10) и ранги приборов, в зависимости от выбранной средневзвешенной зависимости, размещаются в соответствующих таблицах.

Результаты оценки качества датчиков давления

Из проделанного анализа следует, что ранги приборов зависят от вида целевой функции комплексного показателя, и усреднение по пяти

рассчитанным значениям рангов дает более правильный результат. Действительно, комплексный показатель прибора DPharp фирмы YOKOGAWA, рассчитанный по формулам (3 – 6) и (7), устанавливает ранг прибора, равный 2, но при расчете комплексного показателя по (6) ранг прибора получается равный 4, соответственно, в этом случае можно сделать вывод о том, что ранг прибора равен скорее 2, чем 4. Для проверки адекватности методики оценки, экспертам было предложено установить ранг приборов, используя метод попарного сравнения, и фрагмент сводной таблицы характеристик приборов представлен ниже, в таблице 6

Таблица 6

Ранжированные по комплексному показателю качества датчики давления

Ранг прибора	Методика оценки	
	Предложенная методика оценки	Экспертные оценки с использованием метода попарного сопоставления
1	Модель 3051, Emerson	Модель 3051, Emerson
2	DPharp EJA510, Yokogawa	APC-2000, Aplisens
3	DMP 331i, BD Sensors	Dpharp EJA510, Yokogawa
4	APC-2000, Aplisens	Метран-150-ДИ, Метран
5	Метран-150-ДИ, Метран	DMP 331i, BD Sensors
6	Cerabar S, Endress+Hauser	Cerabar S, Endress+Hauser
7	Баратрон, MKS Instruments	UT-11, Wika
8	UT-11, Wika	АИР-20-ДИ, Элемер
9	Модель 1151, Rosemount	Баратрон, MKS Instruments

Использование предложенной методики, как подтверждают экспертные оценки, позволяет без проведения предварительного анализа выявить лидера среди совокупности рассматриваемых приборов и определить уровень качества конкретных приборов. Результаты оценки качества и ранжирования приборов показывают, что модель 3051 фирмы Emerson является в настоящее время лучшим представителем приборов данного назначения, за счет высоких

значений наиболее важных показателей, а именно, основной погрешности, долговременной стабильности, диапазоном перестройки предела и дополнительной температурной погрешности. Менее важными, но внесшими свой вклад в комплексный показатель, является наличие аналогового и цифрового интерфейсов и локального индикатора, а также широкий диапазон питающих напряжений и расширенный диапазон температур измеряемой среды. Датчик

давления APC-2000 фирмы Aplisens, обладающая такими же функциональными возможностями, как и датчик 3051, но обладая значительно меньшей массой и габаритами, не стал лидером из-за заявленной допустимой основной погрешности 0,1% и диапазона перестройки 10:1.

Два этих прибора представляют два различных подхода построения приборов в приборостроении – приборного и модульного. Приборный подход заключается в построении приборов имеющих большое число функций, придающих универсальность прибору, не всегда востребованных потребителем, но заложенных в состав прибора. Приборный подход при построении датчиков давления заключается в придании датчику давления, например, таких свойств и функций, как наличия встроенного источника питания (или сетевого адаптера), локального (встроенного) индикатора, аналогового и цифрового блоков интерфейса, на также сигнализирующего устройства. Модульный подход заключается в построении прибора на основе модулей – однофункциональных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Азгальдов Г.Г., Райхман Э.П. О квалиметрии. М., 1972. 172 с.
2. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. Госстандарт СССР - М.: Издательство стандартов, 1987.
3. Гольдштейн Г.Я. Инновационный менеджмент: учебное пособие. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. 132 с.
4. Непомнящий Е.Г. Экономика и управление предприятием: Конспект лекций. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1997. 374 с.
5. Тульчин Л.Г. Оценка качества электроизмерительных приборов/ Л.Г.Тульчин, А.М.Хаскин, В.Д.Шаповалов.-Л.: Энергоиздат, 1982. – 216 с.: ил.
6. ГОСТ 23554.0-79. Система управления качеством продукции. Экспертные методы оценки качества продукции. Основные положения.
7. ГОСТ 23554.1-79. Система управления качеством продукции. Экспертные методы оценки качества продукции. Организация и проведение экспертной оценки качества продукции.
8. ГОСТ 24294-80. Определение коэффициентов весомости при комплексной оценке технического уровня и качества продукции.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНТЕГРИРОВАННЫЕ СТРУКТУРНО- ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ГОРОДОВ

Сырымкин В.И., Глушков Г.С., Лунев С.О., Бурмантов С.И.

Томский государственный университет», г. Томск, 634050

E-mail: ggs_1982@mail.ru

Системы безопасности и системы охраны объектов стали неотъемлемой частью современной жизни. Сегодня появились и обострились как внутренние, так и внешние угрозы безопасности. Вопросы сохранности собственности постоянно требуют особого внимания.

С ростом уровня криминогенности возрастает и актуальность систем безопасности не только в специальных областях (банки, промышленные предприятия, организации и т. д.), но и во всех сферах жизни. Все более усложняющиеся условия защиты требуют применения все более серьезных систем, комплексно решающих эту задачу.

В процессе развития рынка выявилась тенденция к интеграции различных подсистем, обеспечивающих безопасность в единую систему. Основой для такого рода продуктов стало расширение возможностей вычислительной техники для управления системами безопасности, обработки, хранения и передачи различных данных.

Важнейшей составляющей современных охранных систем являются системы видеонаблюдения, в основе которых лежит видеоанализ. Задача системы видеоанализа — автоматическое получение систематизированной информации с помощью алгоритмов интеллектуальной обработки потока видеоданных без участия оператора системы безопасности. Видеоаналитика представляет развитие функций систем видеонаблюдения, позволяя сократить объем регистрируемых данных. Система идентификации и распознавания образов, имеющая возможность интеграции с различными подсистемами, позволяет сформировать структурированную базу данных событий с сопряженной видеоинформацией. Основная задача системы видеоанализа — исключить человеческий фактор, минимизировав вероятность возникновения ситуации, когда какое-либо событие может быть незамечено или неправильно истолковано.

Создание «Интеллектуальной интегрированной системы охраны» на основе новейших достижений в этой области дает максимально верное решение проблемы безопасности. Главной задачей при построении такой системы является контроль условного объекта (на проникновение) без участия человека. Интеллектуальная система способна самостоятельно принимать решения по заданному алгоритму.

Актуальность этой разработки заключается в способности оперативного реагирования и принятия, необходимых мер по информированию охранных и силовых структур. Система сама анализирует объекты на наличие опасности, что просто необходимо в организациях с большим человека–потоком.

Неотъемлемой частью интеллектуальной системы является программное обеспечение, позволяющее максимально эффективно использовать ресурсы аппаратной части, а так же обеспечить своевременное реагирование на потенциальную угрозу и ведение журнала, отражающего работу системы. Организацию взаимодействия Интеллектуальной системы с человеком обеспечивает интерфейс программы, обладающий такими немаловажными характеристиками как простота и удобство использования.

В настоящее время существует большое количество Интеллектуальных систем, большая часть которых основана на технологии распознавания лица. В комплект систем входят модули, отвечающие за распознавание лица, программное обеспечение и видеокамеры. Среди существующего программного обеспечения можно выделить Treal Webcam Guard, Webcam Xp 2007 Pro / Private V3.72.440, Livewebcam, House Guard V.4.1, Vocord Facecontrol, Orient Sdvr-410 и др.

Однако, несмотря на большое разнообразие аналоговых программных средств, данная область разработки не стоит на месте и активно развивается. Поэтому разработка «Интеллектуальной интегрированной системы охраны» очень актуальна и своевременна.

Технология распознавания в «Интеллектуальной интегрированной системы охраны» основана на сравнении изображений по принципу RGB (красный, зеленый, голубой), т.е. сравнение оттенков текущего изображения с эталоном. За счет автоматизированного процесса сравнения полностью исключается влияние человеческого фактора, что обеспечивает быстродействие работы охранной системы и минимизирует возможные ошибки.

Алгоритмы цветной корреляционной обработки изображений:

$C_k = 1$, при $C_z = C_c = C_p = C_j = C_r = C_b = 0$ или $JR = 1, JG = JB = 0$;

$C_z = 1$, при $C_k = C_c = C_p = C_j = C_r = C_b = 0$ или $JG = 1, JR = JB = 0$;

$C_c = 1$, при $C_k = C_z = C_p = C_j = C_r = C_b = 0$ или $J_B = 1, J_R = J_G = 0$;

$C_p = 1$, при $C_k = C_c = 1, C_z = C_j = C_r = C_b = 0$ или $J_R = J_B = 1, J_G = 0$;

$C_j = 1$, при $C_k = C_z = 1, C_c = C_p = C_r = C_b = 0$ или $J_R = J_G = 1, J_B = 0$;

$C_r = 1$, при $C_c = C_z = 1, C_k = C_p = C_j = C_b = 0$ или $J_G = J_B = 1, J_R = 0$;

$C_b = 1$, при $C_k = C_z = C_c = 1, C_p = C_j = C_r = 0$ или $J_R = J_G = J_B = 1$,

где $C_k, C_z, C_c, C_p, C_j, C_r, C_b$ – соответственно уровни красного, зеленого, синего, пурпурного, желтого, голубого, белого цветов,

J_R, J_G, J_B – соответственно ВКФ, характеризующие красный, зеленый и синий цвета.

ВКФ – Взаимно-корреляционная функция

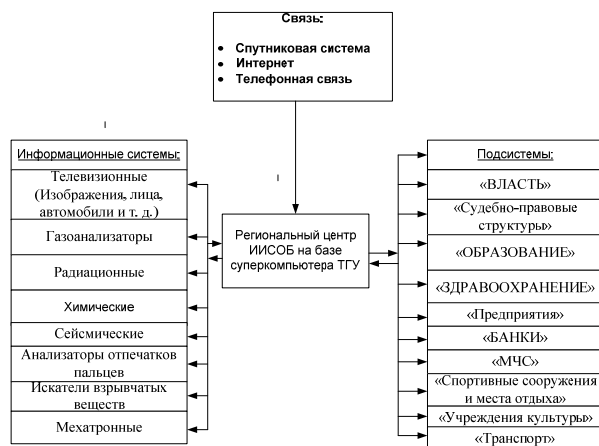


Рис. 1. Блок – схема интеллектуальной интегрированной системы обеспечения безопасности городов

ИИСОБ обеспечивает проведение сбора и анализа информации полученной с датчиков и на основании этих параметров, сопоставляя их с данными базы данных, формирует интегральную оценку объекта.

Новизна ИИСОБ заключается в использовании следующих подходов:

- Новый принцип обработки информации в интегрированных интеллектуальных охранных системах, использующих несколько информационных каналов

- Интеграция таких средств сбора и анализа информации, как телевизионные датчики различных размерностей и цветностей, газоанализатор и анализаторы звука (голоса).

- Высоканадежный и быстродействующий способ распознавания личности человека путем анализа интегральной информации основанной на модифицированных корреляционных, Фурье- и вейвлет алгоритмах, использующих структурные и цветные признаки [1-3].

Принцип действия системы основан на сборе и анализе информации, полученной с датчиков и на основании этих параметров, сопоставляя их с

данными базы знаний, формирование интегральной оценки состояния охраняемой зоны.

Достоинствами разрабатываемой программы являются:

- Высокая надежность и быстродействие, обусловленные наиболее оптимально подобранным алгоритмом работы системы. Что позволяет быстро и своевременно реагировать на возникновение потенциальных угроз.

- Полная автоматизация распознавания образов, что позволяет полностью исключить влияние человеческого фактора на результаты работы охранной системы.

- Максимально эффективное использование ресурсов аппаратной части, что позволяет оптимизировать затраты на использование программы.

- Удобный интерфейс, позволяющий организовать оптимальное взаимодействие между составляющими аппаратной и программной частями системы, а так же обеспечивающее простоту и удобство в использовании.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.И. Сырякин, В.С. Титов, Ю.Г. Якушенков Системы технического зрения // Справочник. – Томск: МГП «РАСКО», 1992.– 367 с.: ил.

2. Герман Кругль Профессиональное видеонаблюдение. Практика и технологии аналогового и цифрового CCTV. – «Секьюрити Фокус», 2010.–672 с.

3. В.Н. Козлов Элементы математической теории зрительного восприятия. – М.: МГУ, 2001. – 122с..

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ЗОНЫ НАПРАВЛЕННОГО РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

Баннов К. В., Матвеев В.С., Градобоев А.В.

Юргинский технологический институт Томского политехнического университета,
Россия, г. Юрга, ул. Ленинградская, 26 (38451)6-22-48

E-mail: bannovkv@mail.ru

Ранее в [1,2] на основе общеизвестных гидродинамических представлений, наблюдаемых при разрушении металлов, была предложена физическая модель направленного разрушения металлов резанием. Было предложено рассматривать процесс резания как процесс направленного разрушения, при котором разрушение происходит по поверхностям резания, определяемых кинематикой процесса. Согласно физической модели процесс направленного разрушения можно представить в виде двух стадий:

- стадия I – накопление энергии в зоне направленного разрушения металла;
- стадия 2 – разрушение металла, доведенного до псевдожидкого состояния, при котором происходит взрывной сброс энергии, накопленной на первой стадии.

Под псевдожидким состоянием металла мы понимаем такое его состояние, когда металл находится в виде жидкости с высокой вязкостью, в которой присутствуют отдельные фрагменты твердого тела.

Цель разносторонняя оценка величины зоны направленного разрушения при резании лезвийным инструментом

Задачи

1. Изучение микроструктуры в продольном и поперечном сечениях металлических стружек полученных точением при различных значениях подачи и скорости резания на примере стали 45.

2. Получение и анализ термограмм образцов из стали 45 при резании и растяжении.

Рассмотрим модельные представления, используемые нами при оценке объема зоны направленного разрушения при резании металлов. На рис.1 показана схема сливного стружкообразования, которая использовалась в качестве основы при проведении расчетов. На данной схеме выделены два экспериментально наблюдаемых слоя в металлической стружке толщиной a_1 с толщинами h_{Σ} и $h_{||}$, которые рассмотрим ниже более подробно.

Данная схема составлена на основании анализа фотографии типичного шлифа корня сливной стружки (рис.2), полученного с помощью специального приспособления ударного действия в режиме свободного резания.

Следует особо отметить, что указанные выше слои проявляются как при свободном, так и при несвободном резании [4]. Кроме того, также отметим, что вид контактного модифицированного слоя $h_{||}$ в сливной стружке

наблюдаемого нами соответствует ранее опубликованным данным [4].

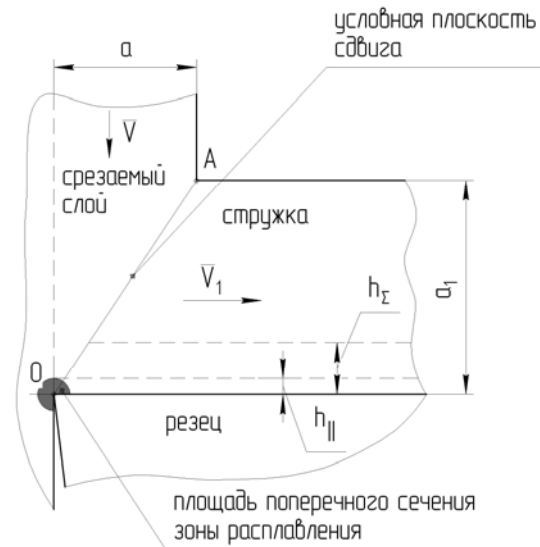


Рис. 1. Схема сливного стружкообразования

Подобные модельные представления применимы как для описания сливной стружки, так и для описания периодической стружки, типичные представители которой показаны на рис.3.

Рассмотрим основные особенности периодической стружки (рис.3) и ее основные отличия от сливной стружки (рис.2).

На шлифах периодической стружки отчетливо просматривается наличие 3-х характерных областей:

- контактный модифицированный слой толщиной $h_{||}$ (область 1 на рис.3);
- область с межзубной локализацией пластической деформации, толщина которой составляет $\sim 1/4$ от толщины зуба (область 2, рис.3);
- область части зуба, толщина которой составляет $\sim 3/4$ от толщины зуба, где структура металла близка к структуре металла до обработки (область 3, рис.3).

Из представленных фотографий видно, что в сливной стружке отсутствует периодичность и, практически, исчезает область 3, которую мы выделили на рис.3 для периодической стружки. Тогда, можно предполагать, что при переходе от периодической стружки к сливной происходит переход от двух стадийного процесса направленного разрушения к одно стадийному

процессу, при котором длительность одной из стадий становится пренебрежимо малой по сравнению с длительностью другой стадии.

Таким образом, при существенной внешней разнице сливной и периодической стружек, в

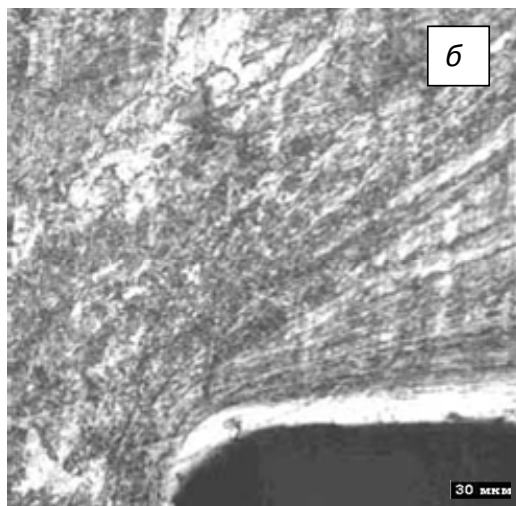
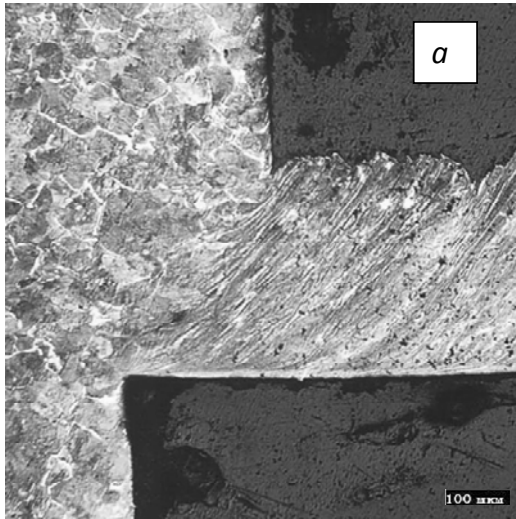


Рис 2. Продольный шлиф корня сливной стружки при разном увеличении

периодической стружке также можно выделить модифицированный слой, структура которого соответствует модельному представлению (слой

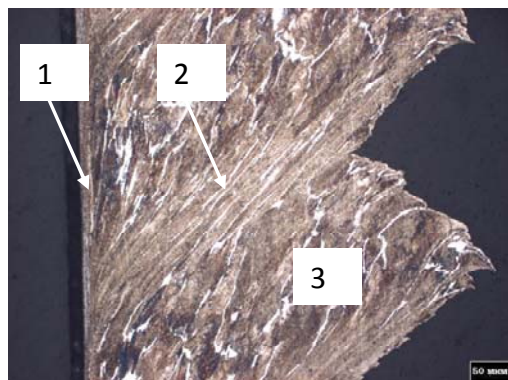


Рис.3. Продольный шлиф периодической металлической стружки

$h_{||}$ на рис.1).

Учитывая то, что разрушение металла происходит в окрестностях режущих кромок (см. рис.2б), в схеме на рис.1 выделена затемненная зона предполагаемого направленного разрушения радиусом $h_{||}$, которая захватывает как обрабатываемый металл, так и стружку, примыкающую к вершине резца. В этом случае на долю зоны направленного разрушения металла приходится $\sim 3/4$ от площади выделенного сечения.

Тогда, полный объем зоны разрушения, с учетом наличия главной и вспомогательной режущих кромок при несвободном прямоугольном резании, можно оценить выражением

$$V \approx \frac{3}{4} \cdot (\pi \cdot h_{||}^2) \cdot (a + b)$$

где $h_{||}$ – толщина модифицированного контактного слоя, измеряется на шлифах как толщина слоя, текстура которого параллельна передней поверхности резца, либо как толщина мелкозернистого слоя, либо как толщина белого слоя, который не травится кислотой (см. рис.2); a – толщина срезаемого слоя; b – ширина срезаемого слоя.

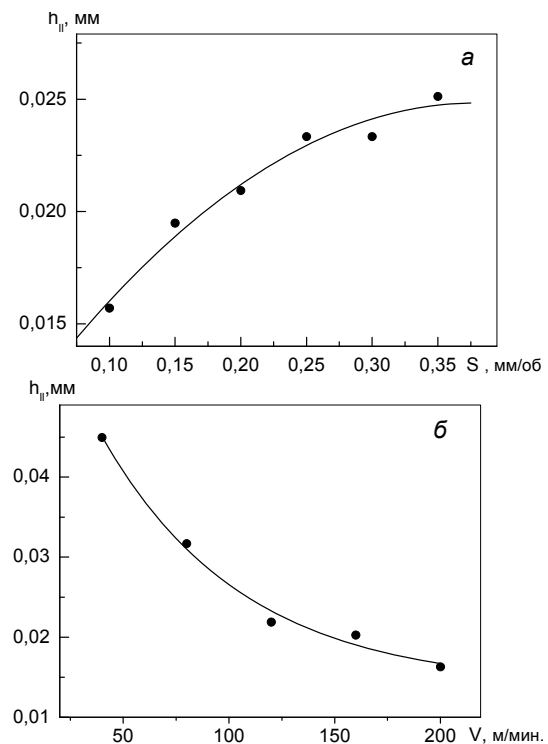


Рис.4. Изменение величины $h_{||}$ для стали 45 в зависимости от режимов резания: а – от подачи при $\gamma = 5^\circ$, $t = 3$ мм, $V = 120$ м/мин; б – от скорости при $\gamma = 5^\circ$, $t = 3$ мм, $S = 0,25$ мм/об

Напомним, что согласно предлагаемой нами модели направленного разрушения [1,2] металл в зоне разрушения находится в псевдожидком состоянии и имеет температуру плавления.

Величину $h_{||}$ можно получить экспериментально путем соответствующих измерений на протравленных шлифах продольных и поперечных сечений металлических стружек. На рис.4 показаны значения $h_{||}$, полученные при различных режимах резания.

Используя полученные значения толщины модифицированного слоя и формулу для объема зоны разрушения, получаем зависимость, показанную на рис. 5.

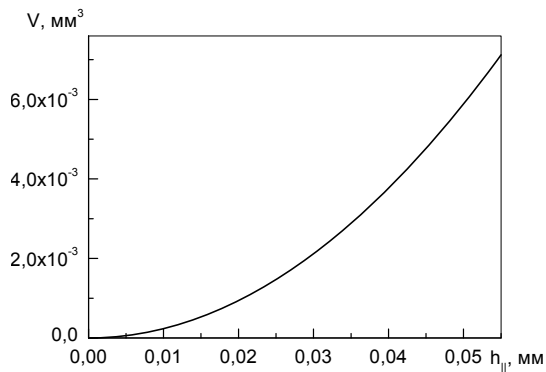


Рис.5. Зависимость объема зоны разрушения от толщины модифицированного слоя $h_{||}$

Таким образом, для режимов резания стали 45, которые указаны в подписях к рис.4, получили, что изменению толщины модифицированного слоя в диапазоне (0,015 – 0,045) мм соответствует изменение объема зоны направленного разрушения в диапазоне $(5 – 50) \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3$.

Для определения температуры в зоне направленного разрушения Тепловизором «ThermaCAM P65HS» в процессе резания производилась съемка и регистрация тепловых полей с торца заготовки, таким образом чтобы регистрировалась температура с поверхности заготовки, резца и стружки. Положение тепловизора строго определялось по отношению к режущей кромки и было неизменным в процессе резания. Типичная картина распределения тепловых полей полученных при торцевом точении представлена на рис. 6.

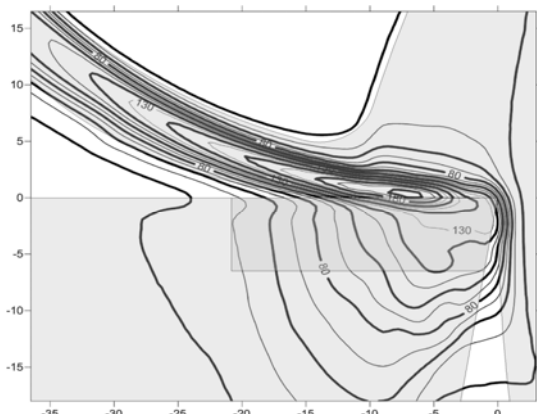


Рис.6. Положение температурных полей полученных при торцевом точении

Температурные поля показывают смещение максимальной регистрируемой температуры от режущей кромки, а не на ней, что можно объяснить переносом тепла движущейся стружки из зоны направленного разрушения. При данном способе регистрации температуры заснять температуру в источнике образования тепла заснять невозможно. В виду представленной причины возникают сложности при обработке тепловых полей. Поэтому для определения температуры в зоне разрушения рассмотрим схему растяжения плоских образцов доводя их до разрушения.

Область расплава при пластическом деформировании металла до разрушения наиболее

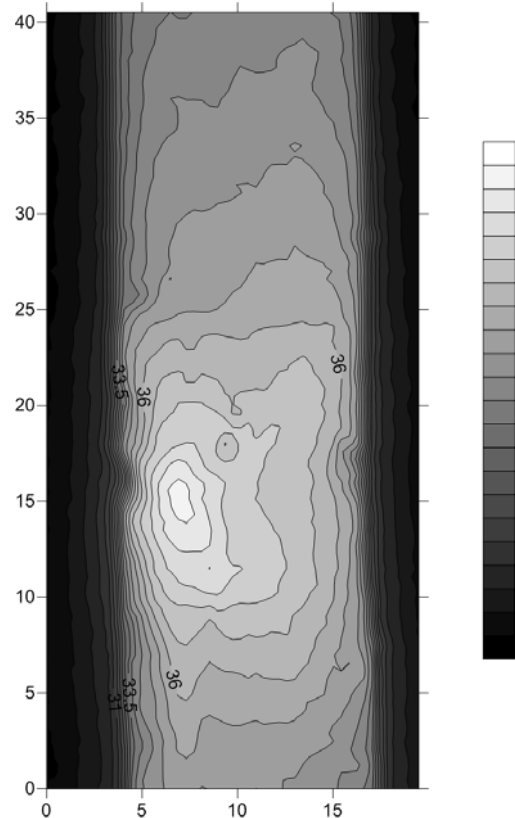


Рис.7. Положение температурных полей в момент предшествующий разрушению

просто и доступно оценить путем тепловизионных наблюдений в стандартных схемах растяжения плоских образцов. С целью конкретизации местоположения поверхности разрыва на образце выполнялся односторонний надрез – концентратор напряжений. Регистрация тепловых полей осуществлялась с помощью тепловизора «ThermaCAM P65HS» при скорости съемки 12 кадр/с. При этом скорость деформации в этой схеме соответствует $1 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Типичный пример зафиксированных положений температурных полей в момент предшествующий разрушению представлен на рис.7.

На рис.8 показана схема обработки тепловых полей. Т.к. изотермы представляют собой кривые

сложной формы для упрощения расчетов наносим на термограмму эллипсы наиболее близкие по размерам к изотермам.

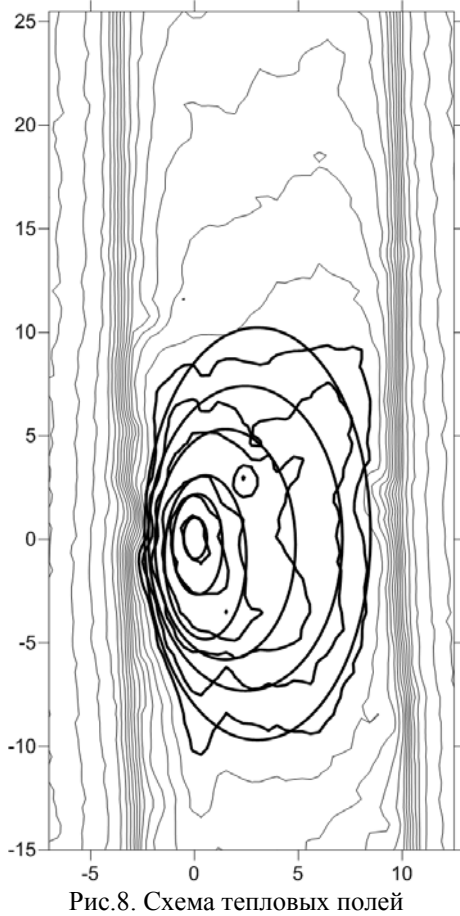


Рис.8. Схема тепловых полей
Метаматематическая обработка представленной картины на рис.8 дана на рис. 9

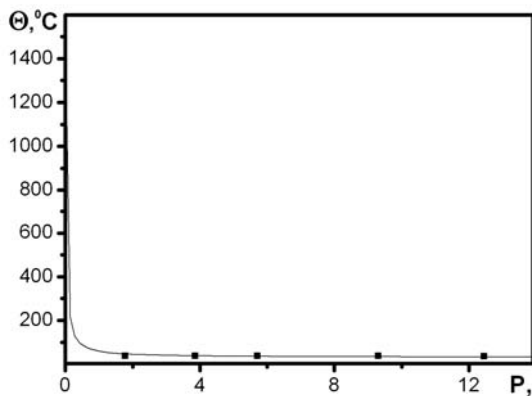


Рис.9. Зависимость температуры от периметра

Представленная зависимость позволяет в упрощенном виде оценить периметр изотермы температура которой составляет 1550°C, значение периметра $P=8 \times 10^{-7}$ мм.

Такая малая величина зоны разрушения по сравнению с зоной направленного разрушения при резании объясняется разными значениями скорости деформации ($1 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ при растяжении,

$1 \times 10^4 \text{ с}^{-1}$ при тчении), разной энергетикой процессов.

Выводы:

1. Двух стадийность процесса резания металлов наиболее наглядно проявляется при образовании периодических (зубчатых) стружек. При переходе от периодической стрижки к сливной происходит переход от двух стадийного процесса направленного разрушения к одно стадийному процессу, при котором длительность одной из стадий становится пренебрежимо малой по сравнению с длительностью другой стадии.
2. Для стали 45 выполнены оценки объема зоны направленного разрушения при резании. При этом установлено, что с ростом подачи объем зоны направленного разрушения (соответственно толщина модифицированного слоя) возрастает, а с ростом скорости резания – уменьшается.
3. Для стали 45 выполнена оценка периметра объема зоны разрушения при растяжении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баннов К.В., Матвеев В.С., Градобоев А.В. Ус// Инновационные технологии и экономика в машиностроении. Конференция - Юрга: май 2009. – Томск: Изд. ТПУ 2009. – С. 194-198.
2. Градобоев А.В., Матвеев В.С., Баннов К.В. Физическая модель направленного разрушения металлов резанием// Роль науки в индустриально-инновационном развитии Казахстана: материалы Международной научно-практической конференции, часть 1 – Усть-Каменогорск: Изд. ВКГУ, 2009. – С. 96-101.
3. Матвеев В.С., Симметрия резания металлов //Современные проблемы машиностроения и приборостроения 1-ая МНПрК 24 – 28 сентября 2002г. Сборник трудов. – Томск: STT 2003, с. 127-129.
4. Развитие науки о резании металлов / Под редакцией Н.Н. Зорева. – М., Машиностроение, 1967. – 416 с.
5. Куфарев Г.Л., Окенов К.Б., Говорухин В.А., Стружкообразование и качество обработанной поверхности при несвободном резании. – Фрунзе: Издательство Мектеп, 1970. – 170с.

МЕТОД ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ КАТАСТРОФ

Апасов А. М.

Юргинский технологический институт (филиал) «Национального исследовательского
Томского политехнического университета», 652050, г. Юрга, ул. Ленинградская, 26
E-mail: mchmyti@rambler.ru

Введение

Реально существующая эффективность процессов производства специальных сталей и сплавов особого качества позволяет обеспечивать в дальнейшем эксплуатационную надежность и долговечность изделий ответственного назначения, работающих в экстремальных условиях [1].

Тем не менее, несмотря на достигнутый высокий уровень развития промышленных технологий, особенно в области специального машиностроения, техногенные катастрофы еще имеют место, а опасность аварий изделий, конструкций и объектов существует всегда. Аварии или определенные отклонения в режимах их работы могут приводить к весьма серьезным последствиям [2,3]. Отказ в работе или разрушение практически неизбежно завершают функционирование любого изделия или объекта и могут привести к необратимым гуманитарным и экологическим последствиям не только в пределах одного региона, государства, но и более того, в планетарном масштабе.

Поэтому очень важно уже на этапе процесса *технологического изготовления* деталей, узлов, изделий и конструкций для подобных объектов из металлов и сплавов на их основе обеспечить их особое качество в дальнейшем.

Отсюда следует, что особое качество может быть достигнуто только при обязательном условии соблюдения высокой степени физической однородности (полное отсутствие дефектов различного структурного уровня), химической однородности (максимальный уровень диспергирования химических элементов и их соединений по всему объему) и структурной однородности металлов и сплавов. Это, в свою очередь, будет гарантировать реальным изделиям и конструкциям из данных сплавов такие механические, физические, химические и другие свойства, информативные параметры которых будут максимально приближены к их теоретическим значениям.

Поэтому особое качество закладывается уже на атомном и наноуровне формирования структуры металлов и сплавов, которые используются при изготовлении вышеуказанных объектов.

Проблема разрушения, освещенная для различных условий нагружения и эксплуатации во многих монографиях и обзорах, представляет сложный комплекс научных и технических вопросов. Совершенно недостаточно освещены в литературе источники зарождения, формирования

и развития трещин, их ветвление, зависимость морфологии поверхности разрушения от режима роста трещин. Заслуживают внимания и такие вопросы, как торможение трещины, и в докритическом состоянии, когда это просто, и в закритическом, когда лавинное распространение хрупкой трещины превращает вопрос если не в проблемный, то безусловно в чрезвычайно сложный технически. До настоящего времени невозможно было зарегистрировать информативные параметры, характеризующие процесс зарождения и формирования неупруга в реальном масштабе времени, который является вторым по степени опасности дефектом после трещины. Практически на текущий момент времени отсутствуют работы по исследованию и разработке методов предотвращения разрушения и, соответственно, катастроф.

Очевидная научная значимость приведенных выше направлений сочетается с тем, что понимание кинетики разрушения и знание основных параметров роста трещины является уже сегодня крайне необходимым для задач конструирования и обеспечения безопасности функционирования изделий и объектов ответственного назначения.

Следовательно, в настоящее время проблема значительного повышения качества, надежности, и долговечности материалов, изделий и конструкций продолжает оставаться одной из актуальных проблем современного научно-технического развития. Особенно эти проблемы важны для изделий, конструкций и объектов, эксплуатирующихся в экстремальных условиях, в частности, при высоких статических и динамических нагрузках, в соприкосновении с агрессивными и опасными средами. Поэтому надежность авиационно-космической, химической, атомной и других видов ответственной техники существенным образом зависит от степени совершенства и качества конструкционных материалов, применяемых в нагруженных узлах таких объектов, а также от строгого соблюдения технологического процесса их изготовления [4].

Каковы же основные причины, приводящие к отказу или разрушению изделий в работе?

Согласно Р. Коллакоту, обычно к авариям приводят ошибки следующих трех типов [5]:

1. Технические ошибки, обусловленные:
 - неправильным проектированием;
 - неправильным изготовлением, когда элементы конструкции не соответствуют проекту;

- неправильной эксплуатацией.
- 2. Организационные ошибки.
- 3. Недостаток квалификации.

Изо всех этих ошибок следует особо выделить те, которые возникают из-за неправильного изготовления изделий, в результате чего образуются трещины и непровары у самого обширного класса изделий с неразъемными соединениями, получаемыми способом сварки, и за возникновением которых в процессе сварки до сих пор очень сложно осуществить контроль. Причем следует отметить, что сварные соединения всегда были и остаются наиболее слабым звеном в общей схеме изделия и конструкции [6]. Это объясняется (в большинстве случаев) физической неоднородностью металла (наличием дефектов различного структурного уровня: точечных, линейных, поверхностных, объемных) в области формирования сварного соединения, что приводит к значительному снижению его физических и механических свойств [7].

С другой стороны, наличие высококачественных материалов и технологий изготовления конструкций при отсутствии эффективных методов диагностики не гарантирует безаварийной эксплуатации.

Значение существующих методов неразрушающего контроля и технической диагностики, а тем более, разработка новейших, сейчас особенно велико, поскольку изношенность парка технологического оборудования в отдельных случаях превышает 65 %.

Следовательно, необходимо разрабатывать методы неразрушающего контроля качества уже на стадии технологических процессов изготовления изделий, в частности, со сварными соединениями. Важнейшими задачами неразрушающего контроля (НК) являются: распознавание дефектов, определение их координат, формы, размеров, оценка степени опасности [8]. Аппаратура должна быть малогабаритной, надежной, а математическое обеспечение должно позволять решать задачи по определению дефекта в реальном масштабе времени.

Один из таких методов основан на анализе параметров упругих механических волн акустической эмиссии (АЭ), возникающей в результате локальной динамической перестройки структуры материала контролируемого изделия, то есть акустико-эмиссионный метод [9–11].

По технической и экономической эффективности АЭ не уступает, а превосходит современные высокие технологии. Принципиально важно, что по информативным параметрам, характеризующим сигналы АЭ, можно судить о характере протекающих физических процессов при технологических

операциях изготовления деталей, узлов и изделий ответственного назначения.

Подход к АЭ как к новой технологии с широкими возможностями раскрывает «потенциал» данного метода, объясняет эффект действия ее на различные производства и имеет преимущества, будучи комплексным, системным подходом, связывающим в единую цепь все проблемы, возникающие от момента изготовления до процесса эксплуатации объекта ответственного назначения. Переход от ограниченных по масштабам применений АЭ к разработке и реализации АЭ-технологий является одной из глобальных проблем развития данного метода [8].

Следует отметить, что сварка в мире будущего представляется нам технологическим процессом, дающим продукцию безупречного качества, лишенную каких бы то ни было дефектов. Контроль качества сварки из операции пассивной (констатация фактов) станет звеном собственно сварочного процесса. Своевременное выявление отклонения параметров режима сварки, надлежащее воздействие на него на основе обратных связей должны предотвратить самую возможность появления дефектов [12].

Более того, с учетом вышеизложенного становится весьма очевидной потребность в создании не только метода определения качества изделия и оценки его надежности, основанного на использовании физических явлений, сопровождающих процесс развития дефектов, но также в разработке и изучении основных принципов метода прогнозирования, управления процессами зарождения источников опасных дефектов (трещин и непроваров) и их предотвращения на самой ранней стадии формирования. Это позволит уже на этапе технологического процесса изготовления изделий и конструкций устранить главную причину возникновения в дальнейшем на этапе эксплуатации техногенной аварии или катастрофы. Однако быстрое и широкое внедрение этого метода связано с решением ряда серьезных задач.

Поэтому в основу данной работы были положены многочисленные результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований процессов трещинообразования при сварке [13–17], возникновения непровара [18], определения координат дефектов [19], структуры металла сварного шва [20], а также устранения трещиноподобных дефектов [21–23], которые были взяты в качестве исходных данных при разработке метода активной диагностики и предотвращения разрушения при сварке цилиндрических изделий [24].

Разработка метода и функциональной схемы устройства активной диагностики

Метод основан на приеме и разделении суммарного сигнала акустической эмиссии (АЭ),

несущего информацию о дефектах, на сигналы, характеризующие источники зарождающихся непроваров и трещин. Образовавшиеся в процессе сварки зоны непроваров через систему обратной связи дополнительно проплавляют, а источники уже зарождающейся трещины в процессе сварки уничтожают мощным импульсом излучения оптического квантового генератора (ОКГ) [24].

Основное требование, предъявляемое к устройству активной диагностики, должно быть таким, чтобы было обеспечено согласование входа данного устройства с выходом измерителя акустических сигналов, к которому данное устройство подключается.

Выход измерителя акустических сигналов, в частности ИАС-4, соответствует триодно-транзисторной логике (ТТЛ) с нагрузочной способностью 4.

В соответствии с вышеизложенным требованием было разработано устройство, реализующее данный метод, функциональная схема которого приведена на рис. 1–4.

На рис. 1. представлена общая функциональная схема системы активного воздействия на зарождающиеся дефекты, состоящая из:

1. Системы приема и обработки информации (блоки 1–17);
2. Блока обратной связи (БОС) 35;
3. Сварочного комплекса (блоки 37, 47, 48, 49, 50, 68, 69);
4. Контролируемого трубопровода 36;
5. Системы активного воздействия на источники зарождающихся трещин (блоки 59, 60, 61).

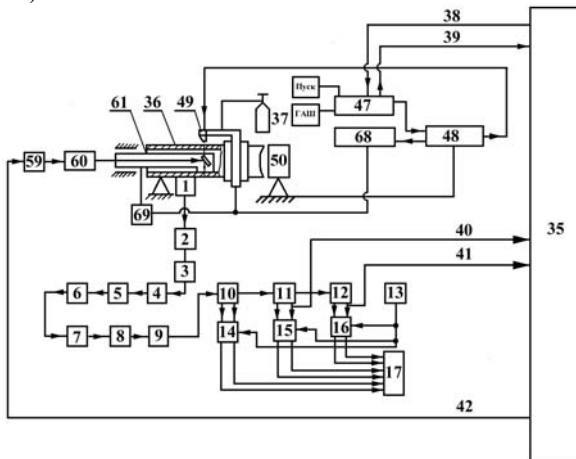


Рис. 1. Функциональная схема сварочного комплекса и системы активного воздействия на зарождающиеся дефекты в процессе сварки

На рис. 2. изображена функциональная схема блока обработки и формирования импульсов (блоки 10, 11 и 12).

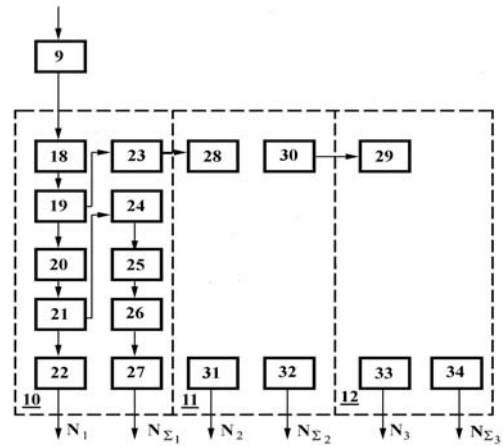


Рис.2. Функциональная схема блока обработки и формирования импульсов

На рис. 3 представлена функциональная схема блока обратной связи 35.

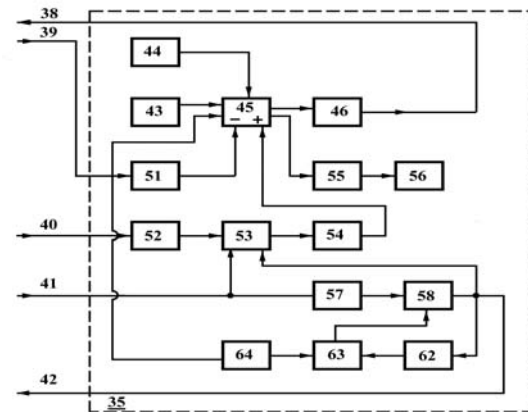


Рис. 3. Функциональная схема блока обратной связи

На рис. 4 изображена функциональная схема активного воздействия на источники зарождающихся горячих трещин в процессе сварки, включающая в себя оптический квантовый генератор 60, оптическую систему 61, контролируемый трубопровод 36.

Описание работы устройства активной диагностики

Устройство активной диагностики работает следующим образом. Предварительно в зону сварки подается защитный газ из баллона 37 (рис. 1).

После запуска сварочного комплекса путем нажатия кнопки “ПУСК” на пульте управления 47 акустическая волна, возникающая в процессе сварки, воспринимается электроакустическим пьезопреобразователем 1, закрепленным на свариваемой трубе 36, преобразуется в электрический сигнал, который после предварительного усиления в предусилителе 2 подается на входной аттенуатор 3 с дискретным шагом дискриминации уровня сигнала.

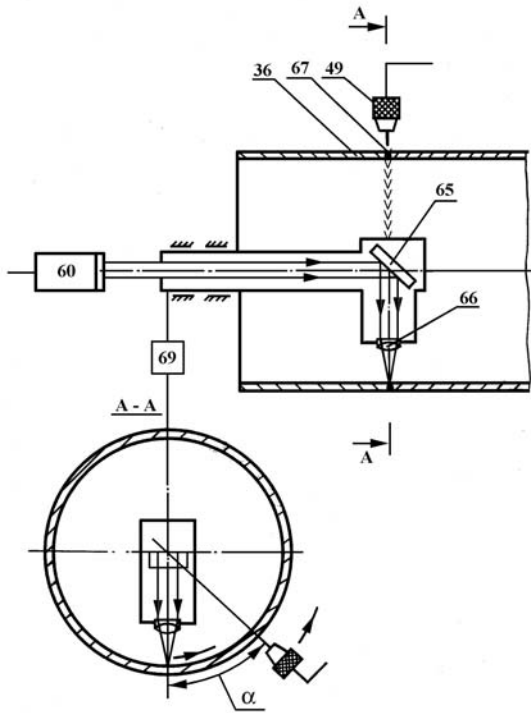


Рис. 4. Функциональная схема активного воздействия на источники зарождающихся горячих трещин в процессе сварки трубопроводов

С аттенюатора 3 сигнал через эмиттерный повторитель 4 поступает на фильтр верхних частот (ФВЧ) 5, служащий для устранения низкочастотных помех производственного происхождения, и усиливается в усилителе 6, охваченном отрицательной обратной связью. Далее сигнал подаётся на фильтр нижних частот (ФНЧ) 7 для ограничения диапазона со стороны высоких частот, т.к. это объясняется сильным затуханием акустических колебаний высокой частоты в конструкционных материалах и, следовательно, принципиальными трудностями выявления таких колебаний на практически приемлемых для реальных целей расстояниях от источника АЭ. С выхода ФНЧ 7 сигнал поступает на усилитель 8, а затем на эмиттерный повторитель 9. После усиления сигнал поступает с выхода эмиттерного повторителя 9 на три канала блока обработки и формирования 10, 11 и 12 (рис. 2), которые позволяют осуществить амплитудную дискриминацию сигнала АЭ по трем уровням (порогам) 18, 28 и 29.

Дискриминация сигнала АЭ по амплитуде на входе каждого канала при необходимости может быть осуществлена входным аттенюатором 3. При этом пороговые устройства 18, 28 и 29 всех каналов через развязывающие цепи (эмиттерные повторители) 23, 30 включены последовательно с целью динамического расширения диапазона при измерениях АЭ. Далее в канале блока обработки и формирования сигнал усиливается усилителем 19, проходит внутреннее пороговое устройство 20,

ограничивающее сигнал снизу с целью отсечки шумов входных цепей и усилителей, а затем поступает на формирование суммарной АЭ 21 и одновременно через эмиттерный повторитель 24, усилитель 25 на формирователи числа импульсов АЭ 26. После формирователей 21 и 26 суммарная АЭ и число импульсов АЭ подается через ключевые каскады 22 и 27, 31–34 на три блока счёта 14, 15 и 16 (рис. 1). Каждый блок счёта работает в паре с одним каналом обработки и формирования и осуществляет одновременно подсчёт активности АЭ и числа импульсов АЭ с преобразованием результатов в аналоговую форму, удобную для записи на самописце 17. Управление работой блоков счёта 14, 15 и 16 осуществляется импульсами, поступающими с формирователя временных интервалов 13.

Перед началом сварки необходимо подготовить к запуску БОС 35 (рис. 3). Для этого с помощью устройства задания начальной величины сварочного тока 43 устанавливают значение начального тока сварки в десятичной системе, на выходе устройства 43 устанавливается указанная величина в двоично-десятичной системе исчисления (коде). Посредством устройства записи 44 величина тока записывается из устройства задания начальной величины сварочного тока 43 в реверсивный счетчик 45. Сигнал на выходе реверсивного счетчика 45 также выражен в двоично-десятичном коде.

Далее сигнал с выхода реверсивного счетчика 45 поступает вход ЦАП 46. В ЦАПе 46 происходит преобразование двоично-десятичного кода с выхода реверсивного счётчика 45 в аналоговый сигнал, который по линии 38 (рис. 1) поступает на пульт управления 47 и устанавливает значение начального тока сварки в сварочном выпрямителе 48, который поступает на сварочную горелку 49, закреплённую на сварочной головке 50.

В случае превышения величины тока сварки в выпрямителе 48 более допустимой, ток через пульт управления 47 по линии 39 поступает на вход компаратора 51 (рис. 3), на выходе которого формируется импульс, поступающий на вычитающий вход реверсивного счётчика 45.

В результате происходит вычитание из установившегося значения сварочного тока и, следовательно, на выходе ЦАП 46 происходит автоматическое уменьшение тока до допустимой величины.

Информация, поступающая с выхода каналов 11 и 12 блока обработки и формирования на вход каналов БОС 35 (рис. 1), может быть выбрана в виде суммарной АЭ или числа импульсов АЭ (рис. 2). Количество каналов выбирают исходя из установленной возможности раздельной регистрации дефектов (например, непроваров, горячих трещин и т.д.), а ширину каждого канала - в соответствии с динамическим диапазоном

амплитуд сигналов от анализируемых процессов, т.к. каждый канал характеризует степень потенциальной опасности дефектов.

Если сигнал, поступающий с выхода эмиттерного повторителя 9 на вход первого канала обработки и формирования 10, не превышает пороговой (эталонной) величины, устанавливаемой пороговым устройством 28 (рис. 2) на входе второго канала блока обработки и формирования 11, то сигнал претерпевает дальнейшую обработку и формирование, поступает на блок счета 14 и далее выводится на самописец 17, а сам процесс считается бездефектным. Пороги срабатывания от сигналов АЭ, несущих информацию от возникающих неспаров и источников зарождающихся горячих трещин в процессе сварки, определяются из предварительных экспериментов.

При отклонении процесса сварки от технологического режима и возникновении ситуации «НЕПРОВАР» сигнал с выхода усилителя 19 первого канала блока обработки и формирования 10 через эмиттерный повторитель 23 открывает пороговое устройство 28 второго канала обработки и формирования 11 (рис. 2). При этом пороговое устройство 29 третьего канала блока обработки и формирования 12, предназначенного для регистрации сигналов от источников зарождающейся трещины, не запускается, так как сигнал АЭ от возникающего неспарова не превышает заданного уровня срабатывания.

В результате превышения сигнала АЭ заданного порога формирователь суммарной АЭ и числа импульсов АЭ второго канала блока обработки и формирования 11 вырабатывает нормированные по амплитуде прямоугольные импульсы напряжения, которые с выхода формирователя 11 по линии 40 (рис. 1) проходят через устройство задержки I (52) и открытый ключевой каскад 53 (рис. 3) на вход ждущего мультивибратора I (54). В этом случае на выходе мультивибратора I (54) формируется импульс, поступающий на складывающий вход реверсивного счётчика 45. В результате происходит сложение данного сигнала с кодовым значением величины первоначального заданного тока сварки в счётчике 45. На выходе ЦАП 46 устанавливается увеличенное значение сигнала сварочного тока, которое поступает по линии 38 через пульт управления 47 в выпрямитель сварочного тока 48, а увеличенный ток уже подается на сварочную горелку 49 (рис. 1). С выхода реверсивного счётчика 45 кроме ЦАП 46 сигнал поступает на вход дешифратора 55, преобразующего двоично-десятичный код в код работы цифрового индикатора сварочного тока 56. В результате на табло цифрового индикатора 56 будет высвечиваться значение действующей в

данный момент времени величины сварочного тока.

Поскольку пороговые устройства 18, 28 и 29 всех трёх каналов обработки и формирования импульсов 10, 11 и 12 включены через эмиттерные повторители 9, 23 и 30 последовательно (рис.2), то сигнал АЭ от источников зарождающейся горячей трещины в процессе сварки проходит через первый и второй каналы блока обработки и формирования 10 и 11, последовательно запуская пороговые устройства 18 и 28, на вход порогового устройства 29 третьего канала блока обработки и формирования 12, в котором происходит формирование прямоугольных импульсов напряжения из-за превышения сигналом АЭ заданного уровня срабатывания порогового устройства. Поэтому импульсы сигналов АЭ от источников зарождающейся горячей трещины поступают на входы обоих каналов БОС 35 как с выхода второго, так и с выхода третьего каналов блока обработки и формирования 11 и 12 (рис. 1).

Для того, чтобы не запускался первый канал БОС 35 (канал корректировки сварочного тока из-за неспарова) сигналом АЭ от источников зарождающейся горячей трещины, импульсы от последних поступают одновременно по линии 40 на устройство задержки I (52) и на вход идущего мультивибратора II (57) по линии 41 (рис. 3), предварительно запирая ключевой каскад 53 для дальнейшего прохождения импульсов с выхода второго канала блока обработки и формирования 11. Поэтому ждущий мультивибратор I (54) не запускается и увеличение сварочного тока не происходит. Далее, импульс с выхода мультивибратора II (57) включает триггер запуска ОКГ 58, сигнал с выхода которого поступает по линии 42 через блок питания 59 на ОКГ 60 (рис. 1). В результате возникает мощный импульс оптического излучения, которое проходя через поворотное зеркало 65 и объектив 66 оптической системы 61, уничтожает источники зарождающейся горячей трещины в сварном шве 67 свариваемой трубы 36 (рис. 1, 4). Оптическая система 61 перемещается с помощью привода 69, запитанного вместе со сварочной головкой 50 от блока питания и управления 68 сварочной головкой (рис. 1), внутри трубы 36, синхронного с вращением сварочной горелки 49, но с запаздыванием на угол α . При этом оптическая ось системы 61 и трубы 36 совпадают. В данном случае угол α между осями сварочного электрода горелки 49 и лазерного луча ОКГ 60 (рис. 4) зависит от температуры образования горячих трещин для данного материала и радиуса сварного шва 67 трубы 36.

С выхода триггера запуска ОКГ 58 сигнал также поступает через устройство задержки II (62) на устройство сброса в "0" триггера запуска ОКГ 58 и последний с задержкой переходит в нулевое состояние (рис. 3). После сброса триггера 58 в «0»

сигнал включения ОКГ 60 снимается. Сигнал включения ОКГ 60 также блокирует ключевой каскад 53 с целью исключения роста величины сварочного тока на время работы ОКГ 60. Устройство первоначального сброса в «0» 64 предназначено для сброса в «0» реверсивного счетчика 45 и триггера запуска ОКГ 58 перед включением всего блока обратной связи 35.

Обсуждение результатов

Для проверки работоспособности разработанного устройства проводилась автоматически аргонодуговая сварка неплавящимся электродом стыковых соединений труб без разделки кромок из стали 08Х18Н10Т различных типоразмеров.

В процессе сварки на пониженных значениях импульсного постоянного тока от 10 до 40 ампер срабатывало пороговое устройство блока обратной связи от сигналов АЭ, свидетельствующих о возникающем непроваре. В результате автоматически увеличивался сварочный ток до 50А и сварочная головка дополнительно проплавляла зоны непроваров на 2-ом походе при увеличенном значении тока. Отсутствие непроваров было подтверждено методом рентгенографии и металлографическими исследованиями.

Кроме того, в процессе сварки инициировалось трещинообразование по методике, изложенной в [14, 15]. Методом капиллярной цветной дефектоскопии и рентгенографии констатировалось наличие трещин с раскрытием порядка 0,07 - 0,1 мм.

С целью проверки эффективности борьбы с трещинами посредством воздействия на них концентрированных потоков когерентного излучения была использована технологическая лазерная установка КВАНТ 12. При генерации оптическим квантовым генератором мощного импульса излучения, сфокусированного в зоне выхода на поверхность сварного шва трещины, в локальной области высоких температур получались тепловые потоки с высокой плотностью энергии. В результате воздействия концентрированных тепловых потоков в данной зоне произошло расплавление металла, устранение дендритов и гомогенизации межкристаллитных прослоек, измельчение зерен, а также генерация импульсных термоупругих полей сжатия, которые послужили своеобразным барьером для источников зарождающихся трещин в тех зонах, где произошло расплавление металла. При этом осуществлялась регистрации сигналов АЭ.

В литературе [21–23] представлено амплитудное распределение сигналов АЭ от воздействия лазерным лучом на металл в зависимости от числа импульсов излучения. Из анализа данного распределения следует, что амплитуда сигналов АЭ от воздействия лазерного

излучения соответствует амплитудам импульсов АЭ, характеризующих процессы плавления и кристаллизации металла при сварке, что гораздо меньше значений амплитуд сигналов от источников зарождающихся трещин и возникающих непроваров.

Таким образом, различие энергетических параметров позволяет беспрепятственно проводить амплитудную селекцию сигналов АЭ от процессов плавления, кристаллизации, воздействия излучения ОКГ и трещинообразования.

Многочисленные металлографические исследования микрошлифов [21–23] полностью подтвердили эффективность применения излучения оптического квантового генератора для устранения сформировавшихся трещин, не говоря уже об источниках зарождающихся трещин.

По результатам опытной апробации разработанного устройства активной диагностики разрушения проведена корректировка технологического режима сварки цилиндрических изделий ответственного назначения, эксплуатация которых протекает в эстремальных режимах.

Выводы

1. Разработан метод, основанный на приеме и разделении суммарного сигнала АЭ, несущего информацию о дефектах, на сигналы АЭ, характеризующие источники зарождающихся непроваров и трещин. Образовавшиеся в процессе сварки зоны непроваров через систему обратной связи дополнительно проплавляют, а источники уже зарождающейся трещины в процессе сварки уничтожают мощным импульсом излучения оптического квантового генератора, обеспечивая при этом высокую степень физической однородности металла сварного соединения.

2. Установлено, что амплитуда сигналов АЭ от процессов, сопровождающих сварку (в том числе и воздействие лазерного излучения на металл), существенно меньше значений амплитуд сигналов АЭ от возникающего непровара и источников зарождающейся трещины.

3. Использование разработанной технологии позволит:

- оперативно проводить контроль качества сварных швов в процессе сварки в реальном масштабе времени;
- получать бездефектные сварные соединения в результате автоматической корректировки режима в ходе процесса сварки и устранения источников зарождающейся трещины;
- использовать метод АЭ как штатный метод неразрушающего контроля сварных соединений;
- снизить трудоемкость изготовления изделий за счет исключения методов рентгенографии и ультразвукового контроля и операции устранения дефектов;

– улучшить условия труда за счет устранения вредного влияния рентгеновского излучения на организм обслуживающего персонала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Латаш Ю. В. Современные способы производства слитков особо высокого качества / Ю. В. Латаш, В. Н. Матях ; под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. – Киев, 1987. – 336 с.
2. Патон Б. Е. Об основных направлениях работ в области акустической эмиссии / Б. Е. Патон // Акустическая эмиссия материалов и конструкций : 1 Всесоюз. конф. – Ростов н/Д, 1989. – Ч. 1. – С. 5–10.
3. Акимова Т. А. Техногенные аварии и катастрофы // Энергия: экономика, техника, экология. – 2009. – № 5. – С. 22–26.
4. Алешин Н. П. Диагностирование объектов стартовых комплексов изделий ракетно-космической техники с использованием акустических методов контроля / Н. П. Алешин, Г. А. Бигус, М. А. Лютов // Дефектоскопия. – 2002. – № 3. – С. 3–13.
5. Коллакот Р. Диагностика повреждений : пер. с англ. / Р. Коллакот. – М., 1989. – 512 с.
6. Апасов А. М. Исследование структуры металла сварного соединения из коррозионно-стойкой стали / А. М. Апасов, Э. В. Козлов // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2009. – Т. 315, № 2. – С. 155–161.
7. Алешин Н. П. Работы МГТУ им. Н. Э. Баумана в области неразрушающего контроля материалов и изделий // Сварочное пр-во. – 2003. – № 1. – С. 35–38.
8. Акустико-эмиссионная диагностика конструкций / А. Н. Серьезнов [и др.]. – М., 2000. – 280 с.
9. Грешников В. А. Акустическая эмиссия / В. А. Грешников, Ю. Б. Дробот. – М., 1976. – 272 с.
10. Иванов В. И. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений / В. И. Иванов, В. М. Белов. – М., 1981. – 184 с.
11. ГОСТ 27655 – 88. Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения. – М., 1988. – 12 с.
12. Патон Б. Е. Новые рубежи сварочной техники // Сварочное пр-во. – 1970. – № 4. – С. 3–6.
13. А. С. 1374123 СССР, МПК G 01 N 29/04. Способ А. М. Апасова исследования трещинообразования в процессе сварки изделий из однородных металлов / А. М. Апасов. – 4064613/25-28 ; заявл. 06.05.86 ; опубл. 15.02.88, Бюл. № 6. – 4 с.
14. Апасов А. М. Анализ разрушения сварных соединений в процессе сварки // Дефектоскопия. – 1996. – № 10. – С. 24–30.
15. Apasov A. M. Analysis of failure of welded joints during welding // Russ. J. of Nondestruct. Test. – 1996. – Vol. 32, № 10. – P.757–762.
16. Апасов А. М. Связь дефектов различного структурного уровня с фазовыми переходами при сварке аустенитных сталей / А. М. Апасов, А. А. Апасов // Изв. вузов. Физика. – 2000. – Т. 43, № 11. – С. 15–19.
17. Апасов А. М. Механизм разрушения сварных соединений в процессе сварки / А. М. Апасов // Расплавы. – 2001. – № 3. – С. 18–24.
18. Пат. 2212030 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/14. Способ обнаружения непровара / А. М. Апасов, А. А. Апасов – № 2001104168/28 ; заявл. 13.02.01 ; опубл. 10.09.03, Бюл. № 25 (II ч.). – 14 с.
19. Апасов А. М. Устройство для определения координат дефектов в сварных соединениях по сигналам акустической эмиссии // Сварочное пр-во. – 1997. – № 11. – С. 54–57.
20. Апасов А. М. Анализ структуры сварного шва из стали 08X18H10T / А. М. Апасов, Э. В. Козлов, А. А. Апасов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2001. – № 12. – С. 19–22.
21. Апасов А. М. Исследование процесса устранения трещиноподобных дефектов в стали // Металловедение. – 1998. – № 3. – С. 54–56.
22. Апасов А. М. Взаимодействие концентрированных потоков лазерного излучения с трещиной в стали // Физ. и химия обработки материалов. – 2000. – № 4. – С. 34–38.
23. Апасов А. М. Воздействие концентрированных потоков энергии излучения оптического квантового генератора на дефекты структуры сталей аустенитного класса // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2000. – № 10. – С. 52–55.
24. Апасов А. М. Активная диагностика разрушения и предотвращения техногенных катастроф: монография / А. М. Апасов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 216 с.

РЕЗОНАТОРНЫЙ СВЧ ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КРЕМНИЯ «СОЛНЕЧНОГО КАЧЕСТВА»

Юрченко А.В., Новиков А.Н., Китаева М.В.

Томский политехнический университет, Томск, пр. Ленина, 30, Россия.

E-mail: niipp@inbox.ru

Экспериментальные исследования показывают, что при производстве фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) и в процессе их эксплуатации появляется разброс их характеристик: КПД, тока короткого замыкания, напряжения холостого хода [1]. Этот разброс наблюдается при одинаковых условиях изготовления структур и может составлять от 10 до 30 %. Основной причиной подобного разброса является неоднородность исходного материала для изготовления ФЭП. В современных условиях все больше внимания при производстве ФЭП уделяется поликристаллическим материалам. Поэтому актуальна проблема контроля планарной неоднородности как исходного материала, так и готового ФЭП, особенно на стадии отработки технологии их изготовления. Для обеспечения данного контроля необходима разработка метрологического оборудования дающего возможность прогнозировать параметры ФЭП. Решение данной задачи позволит сформулировать требования к исходному сырью, внедрение которых обеспечит минимальный разброс выходных параметров ФЭП и достижение максимально возможной эффективности.

В связи с этим, возникает потребность детального измерения основных электрофизических параметров: удельного сопротивления, времени жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ) и типа проводимости кремния на стадии входного контроля производства ФЭП. Необходимо также разработать методики, позволяющие контролировать данные параметры в готовых ФЭП.

В данной статье исследованы неразрушающие СВЧ и оптические методы для бесконтактного локального измерения удельного сопротивления, времени жизни ННЗ в моно- и поликристаллических полупроводниках, а также времени жизни в ФЭП.

Проблема измерения поликристаллических полупроводников

Одним из перспективных и дешевых материалов для изготовления солнечных батарей является мультикремний, производство, которого организуется в ЗАО «Кремний» Иркутске. Поэтому технология его изготовления требует детального измерения, в особенности: удельного сопротивления. Измерение этого параметра в поли-кристаллическом материале до сих пор является сложной задачей, вследствие наличия в кристалле межзеренных границ. В частности затруднены измерения на постоянном токе с

использованием известных методов, таких как четырехзондовый и его разновидности, Вандер-Пау, эффект Холла и других. В данной работе для измерения этих параметров рассматриваются бесконтактные СВЧ методы.

Анализ бесконтактных методов измерения удельного сопротивления кремния

Контактный метод, основан на регистрации протекания тока через образец. Параметры полупроводника можно определить различными способами [5], например, путем измерения фотопроводимости, фототока, фото-ЭДС, ЭДС Холла, магнитосопротивления, фотолюминесценции и т.д. Достоинство контактных методов - простота их реализации. Основным недостатком таких методов является необходимость создания омических контактов или р-п переходов. При этом происходит нагрев материала, что приводит к изменению электрофизических и рекомбинационных характеристик полупроводников. Более того, подобные методы предусматривают протекание тока через образец, что делает невозможным осуществление измерений в поликристаллическом полупроводнике из-за наличия межзеренных границ в объеме кристалла.

Бесконтактные методы основаны на поглощении электромагнитной энергии свободными носителями. Данные методы подразделяются на оптические и радиоволновые методы [1-4]. *Оптический метод* был предложен еще в 1956 году [6], когда возбужденные импульсом видимого света ННЗ зондировались лучом инфракрасного света. Инфракрасная диагностика пластин (томография) с использованием лазерных сканеров и компьютеров достаточно дорога, и их применение оправдано лишь в случае кремния высокого качества и при высокой однородности по всему объему. Кроме того оптические методы обладают меньшей чувствительностью чем радиоволновые методы.

Большую группу представляют радиоволновые методы, которые подразделяются на *резонаторный* и *волноводный*.

При волноводном методе - образец размещают в волноводе, регистрируют коэффициент отражения или пропускания. Установки, реализующие данный метод – просты в реализации, но обладают низкой чувствительностью испытаниям образцов малого размера.

Использование микроволновых методов для измерения электрофизических параметров

полупроводников получило наиболее широкое распространение, ввиду низкой стоимости приборов и возможности быстрого сканирования по площади. Принцип действия этих методов основан на регистрации потерь СВЧ мощности, вносимых свободными носителями исследуемого образца в СВЧ поле измерительного датчика. При измерении удельного электрического сопротивления величина потерь СВЧ мощности напрямую определяет удельное сопротивление образца.

Приборы, построенные по такому принципу были сконструированы в Сибирском физико-техническом институте (г. Томск). В качестве измерительного датчика использовали резонатор квазистационарного типа с концевым измерительным отверстием. Данные установки показали хорошие результаты, но, тем не менее, уровень их внедрения был низок.

Нами была произведена модернизация конструкции квазистационарного резонатора, чтобы изучить возможность его применения для низкоомных материалов, таких как «солнечный» кремний. Увеличение частоты до 6.5 ГГц позволило на порядок уменьшить габариты резонатора. Это позволило минимизировать конструкцию установки, а использование генератора и детектора в виде интегральных микросхем позволило сократить число единиц дополнительного оборудования.

Структура измерительной установки на основе автодинного датчика, представленная на рисунке 1, содержит: генератор, управляемый напряжением и, настроенный на частоту 6.5 ГГц; квазистационарный резонатор, обеспечивающий связь электрического поля с образцом; детектор-усилитель в виде одной интегральной микросхемы и микроконтроллер для цифровой обработки сигнала с детектора.

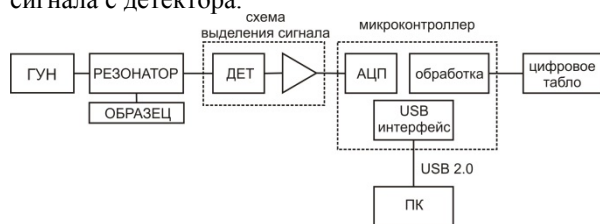


Рис. 1. Структура измерительной установки на основе квазистационарного резонатора

Конструкция квазистационарного резонатора обеспечивает концентрацию электрического поля вблизи поверхности образца в области диаметром 1 мм. Такая локальность дает возможность проводить измерения не только в образцах монокристаллического кремния, но и в некоторых поликристаллических полупроводниках.

Связь электрического поля резонатора с образцом иллюстрируется рисунком 2, где красным цветом показана область максимальной

концентрации электрического поля, зеленым цветом область нулевой концентрации.

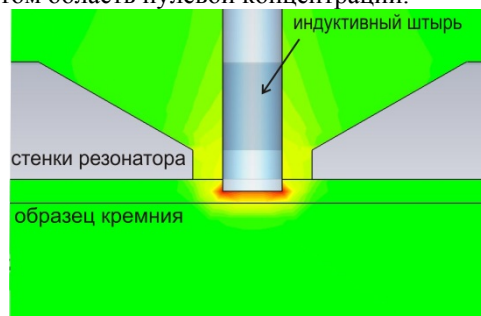


Рис. 2 Концентрация электрического поля вблизи поверхности образца

Благодаря достоинствам рассматриваемого датчика – конструктивной простоте, малогабаритности, общедоступности, маломощности элементов, бесконтактности измерения и удобству эксплуатации – он может найти широкое применение в полностью автоматизированных системах контроля изделий в полупроводниковой электронике, производстве материалов, в том числе кремния «солнечного качества» и других областях.

Применение СВЧ методов для бесконтактного измерения времени жизни неравновесных носителей заряда в поликристаллическом кремнии

Использование СВЧ смещения для наблюдения импульсной фотопроводимости и определения времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниках давно известно. На основе этой методики разработано большое количество измерительных приборов [2, 5, 7], однако они малоэффективны при измерении полупроводников с низким удельным сопротивлением 0,1...10 Ом·см и малым временем жизни 0,1...10 мкс, т. е. для материала, используемого при производстве солнечных батарей.

Лучшим по всем характеристикам оказался кольцевой накладной датчик нерезонаторного типа. При создании прибора на его основе были оптимизированы все блоки с точки зрения повышения уровня сигнала фотопроводимости, а именно, канал оптического возбуждения (ток накачки, время нарастания зондирующего импульса), СВЧ генератор (его частота и мощность), длина волны и мощность излучения светодиодов. В результате был создан прибор, на котором были проведены измерения времени жизни ряда образцов мультикремния из Института Геохимии СО РАН г. Иркутска и на низкоомных образцах монокристаллического кремния.

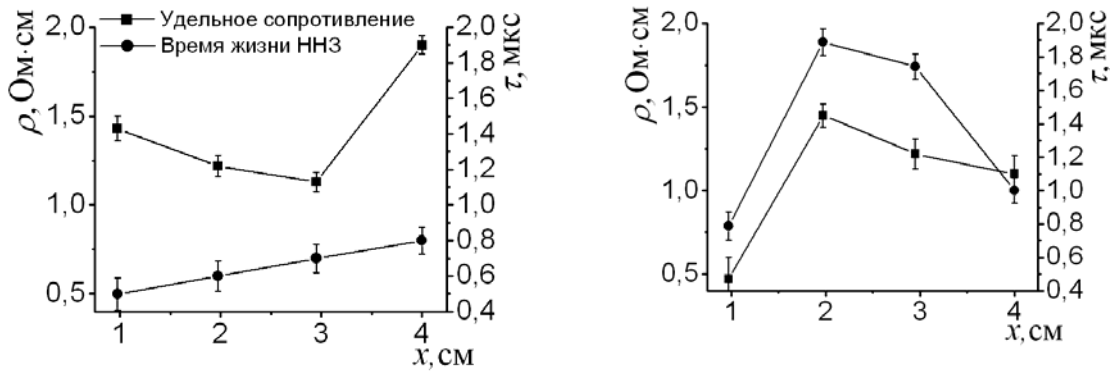


Рис. 3. Результаты измерения удельного сопротивления ρ и времени жизни ННЗ τ в образцах кремния

Методика бесконтактного определения типа проводимости

Метод основан на определении знака изгиба зон поверхности полупроводника импульсной фотоЭДС, который несет однозначную информацию о типе проводимости.

В работе [6] описан принцип действия устройства для измерения типа проводимости полупроводников методом поверхностной фотоЭДС. Устройство предназначено для локального бесконтактного определения типа проводимости в полупроводниках типа германия, кремния, арсенида галлия при комнатных и азотных температурах по торцам и образующим слитков. Оно позволяет определять тип проводимости в широком диапазоне значений удельного сопротивления полупроводников ($10^0 \dots 10^6$ Ом·см).

Эффективность планарно-неоднородных фотоэлектрических преобразователей

С использованием установки измерения интегральных характеристик [7] были проведены экспериментальные исследования влияния последовательного сопротивления и расстояния между токосборниками на КПД ФЭП. Измерения КПД и последовательного сопротивления проводили при одинаковой мощности имитатора солнечного излучения равном 1000 Вт/м^2 . Калибровку мощности имитатора проводили относительно вторичных эталонов – ФЭП, изготовленных и измеренных в АОЗТ «Силикон» на установке СП «Интертехника». Для измерения распределения фотоотклика на поверхности ФЭП была разработана методика, а также установка для измерения дифференциальных параметров ФЭП. Методика основана на измерении изменения фототока в цепи смещения ФЭП при локальной засветке оптическим излучением ($\lambda=475; 590; 660; 860; 940 \text{ нм}$) его лицевой поверхности при перемещении ФЭП по двум координатам относительно засветки. Разработанная установка позволяет проводить измерения локальных спектральных характеристик с погрешностью

локализации до $0,1 \text{ мм}$, что позволяет экспериментально разделить вклад в планарную неоднородность ФЭП на технологическую и подложечную составляющую.

Для анализа физики процессов и более детального исследования влияния неоднородного распределения фотоотклика ФЭП на его КПД были выбраны 100 ФЭП площадью 29 см^2 с КПД от 4 до 15,4 %, а также ФЭП изготовленные на подложках из поликристаллического кремния. Наиболее типичные характеристики ряда ФЭП представлены в таблице 1.

Существует обратно пропорциональная зависимость КПД от удельного разброса D_λ исследуемого ФЭП на различных длинах волн. Это означает, что основной вклад в удельный разброс фотоотклика вносит базовая область ФЭП, прежде всего величина диффузионной длины электронов или, что то же самое, время жизни.

Экспериментальные исследования неоднородности распределения коэффициента отражения на данных длинах волн показывает, что он вносит незначительный вклад (до 0,03) в удельный разброс фотоотклика по сравнению с неоднородным распределением электрофизических параметров лицевого слоя и подложки.

Для уточнения влияния планарной неоднородности измерены распределения спектрального фотоотклика SR по площади ФЭП на различных длинах волн для образца S7. Данный образец имеет характерное распределение фотоотклика для пластин с КПД < 10 %, доля подобных образцов составила более 90 % от общего числа исследуемых пластин с КПД < 10 %. На рисунке 4, а, представлено распределение спектрального отклика для образца S7 при $\lambda=940 \text{ нм}$.

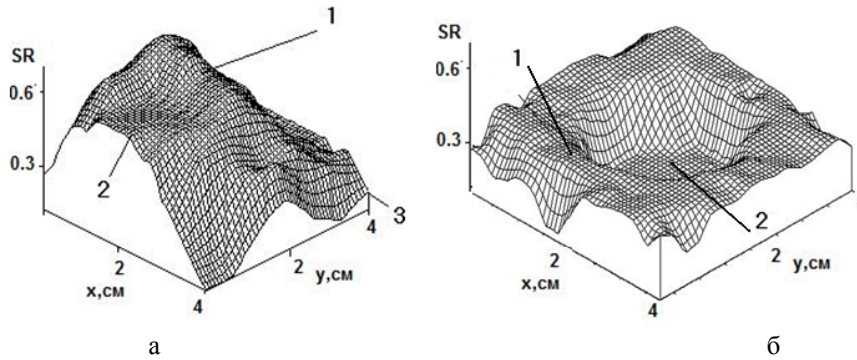


Рис. 4. Распределение спектрального отклика SR по площади ФЭП для образцов: а) S7 при $\lambda=940$ нм; б) на поликристаллическом кремнии при $\lambda=660$ нм

В рассматриваемой пластине ФЭП можно выделить три характерные области: с повышенным (1), средним (2), пониженным (3) фотооткликом. Для более детального изучения областей 1, 2, 3 эти области были вырезаны из исследуемого ФЭП S7. При исследовании этих областей установлено, что область 1 обладает КПД 15 %, область 2 – 9,5 %, область 3 – 6,5 %.

На рисунке 4б представлено распределение фотоотклика по пластине ФЭП, изготовленной на подложке из поликристаллического кремния. КПД такой структуры измерить не представлялось возможным, вследствие малости фотоотклика (порядка 10 мА с 29 см²). Анализ распределения фотоотклика показал его отсутствие в середине образца, тогда как по краям образца фотоотклик наблюдался. Для более детального изучения образца исследуемого ФЭП были вырезаны области 1 и середина область 2. Установлено, что ФЭП из области 1 обладает относительно высоким КПД 5 %, в то время как ФЭП из области 2 имеет КПД=0 (ВАХ омического сопротивления).

На рисунке 5 представлены зависимости распределения диффузионной длины носителей заряда по координате, измеренные СВЧ методом в пластине поликремния и оптическим методом в ФЭП, изготовленной из этой пластины. С помощью СВЧ метода определяли время жизни ННЗ и затем производили его перерасчет в диффузионную длину. Как видно из рисунка, результаты измерений практически совпадают, что говорит о возможности применения СВЧ метода, используемого для контроля параметров материала для изготовления солнечных элементов до процесса изготовления ФЭП.

Рис. 6 демонстрирует распределение спектрального отклика при $\lambda=660$ нм по пластине ФЭП изготовленной из поликремния. На этом же рисунке представлено распределение типа проводимости в структуре ФЭП, измеренное вышеописанным методом.

Таким образом, применение неразрушающих СВЧ методик для измерения электрофизических параметров кремния и оптических спектральных методик для измерения локальных характеристик

ФЭП позволяет проводить отработку технологии изготовления ФЭП. Особенно полезны данные методики при разработке ФЭП на поликристаллах, где исходный материал может иметь существенно неоднородное распределение времени жизни ННЗ, удельного сопротивления и типа проводимости.

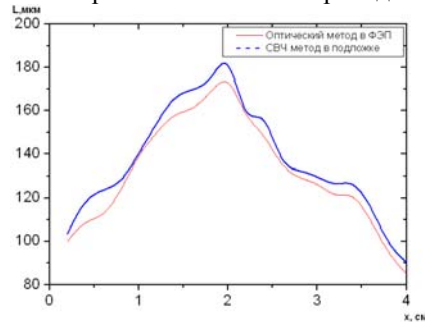


Рис. 5. Профиль диффузионной длины L для образца S7, измеренный СВЧ методом до изготовления ФЭП и оптическим методом после его изготовления

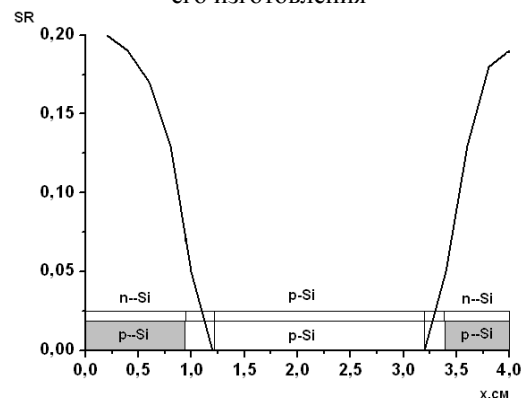


Рис. 6. Профиль спектрального отклика по пластине поликремния и распределение типа проводимости по пластине

Выводы

Рассмотрены бесконтактные методы неразрушающего контроля электрофизических характеристик полупроводниковых материалов. На их основе созданы новые приборы, с помощью которых проведено исследование неоднородности распределения времени жизни неосновных

носителей заряда, удельного сопротивления и типа проводимости в пластинах моно- и поликремния и проанализировано их влияние на характеристики фотоэлектрических преобразователей.

Показано, что основной вклад в снижение эффективности фотоэлектрических преобразователей вносит разброс значений времени жизни неосновных носителей заряда (диффузионной длины) в базе преобразователя.

Показана эффективность предложенных методик для отработки технологии изготовления фотоэлектрических преобразователей на новых материалах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чихман А.В., Мызгин В.С., Воторопин С.Д., Юрченко В.И., Крылов С.В. Автоматизированная установка на основе автодинных датчиков КВЧ-диапазона для контроля материалов. Электронная промышленность. №1-2, 1998 г.
2. Гордиенко Ю.Е., Старостенко В.В. Измерение толщины и удельного сопротивления с помощью техник СВЧ. Материалы Всесоюзного симпозиума «Генерация СВЧ колебаний на эффекте Ганна», Новосибирск, 1974, с.366.
3. Наливайко Б.А., Воторопин С.Д. Резонаторный метод контроля полупроводников. – Электронная техника, сер.12, Физико-химические методы контроля в электронике. 1971, вып.4(10), с.8-11.
4. Литвин С.В., Юрченко В.И. Исследование многослойных эпитаксиальных структур проходном резонаторе. – Электронная техника. Сер.2, Полупроводниковые приборы, 1981, вып.7(150), с.2-6.
5. Обзоры по электронной технике. Измерение удельного сопротивления полупроводниковых материалов методом сопротивления растекания. (Малышев В.А. – М. 1978 вып.6(204), сер. Полупроводниковые приборы).
6. N.Y Harrik, Y Appl. Phys 27(12), 1956.
7. Aberle A.G., Altermatt P.P., Heiser G., Robinson S.J., Wang A., Zhao J., Krumbeir U., Green M. Limiting loss mechanisms in 23 % efficient silicon solar cells // J. Appl. Phys. – 1995. – V. 77. – № 7. – P. 3491–3504.
8. Детинко М.В., Медведев Ю.В., Петров А.С. Физические основы неразрушающего СВЧ-резонансного метода локального контроля электрофизических параметров полупроводников.– Томск: Изд-во ТГУ, 1988. – 30 с.
9. Ахманаев В.Б., Медведев Ю.В., Петров А.С. Резонатор для бесконтактного измерения удельного сопротивления полупроводниковых материалов // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1981. – Вып. 4. – С. 48–51.
10. Медведев Ю.В., Скрыльников А.А. Бесконтактный СВЧ-резонаторный метод измерения подвижности свободных носителей заряда в полупроводниках // Известия вузов. Физика. – 1985. – Т. 38. – № 7. – С. 28–31.
11. Miyamoto N., Nishizawa J. Contactless measurement of resistivity of slices of semiconductor materials // Research institute of electrical communication. – 1967. – V. 38. – № 10. – P. 360–367.
12. Лапатин Л.Г., Петров А.С., Киселев И.И. Экспрессное определение электрофизических и рекомбинационных характеристик особо чистого германия бесконтактными методами: Препринт. – М.: ЦНИИ Атоминформ, 1986. – 28 с.
13. Мочалов И.Г., Ушеренко А.А., Юрченко А.В. Автоматизированная система измерения характеристик фотоэлектрических преобразователей // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» (Датчик-96): Тез. докл. VII научно-техн. конф. / Под ред. В.Н. Азарова. – М.: МГИЭМ, 1996. – Т. 2. – С. 404–405.
14. Ушеренко А.А., Юрченко А.В. Планарная неоднородность фоточувствительности фотоэлектрических преобразователей // Электронная промышленность. – 1998. – № 1–2. – С. 108–111.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ТОМОГРАФИЯ СКРЫТЫХ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ

Якубов В.П., Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н.

Томский государственный университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36

E-mail: shipilov@webmail.tsu.ru

Аннотация: В работе рассматривается томографический подход для восстановления радиоизображения движущихся объектов за диэлектрическими преградами при сверхширокополосном (СШП) импульсном зондировании. В основе подхода лежит метод фокусировки отраженных СШП сигналов, и алгоритм фильтрации сигналов от неподвижных целей. Рассмотрен подход для оценки параметров диэлектрического слоя и компенсации его влияния на сигнал при многопозиционном зондировании. Показана принципиальная возможность регистрации колебательных движений, связанных с перемещением грудной клетки человека, в процессе дыхания. Работоспособность предложенных алгоритмов подтверждается результатами численного моделирования и обработки натуральных экспериментов.

Основная идея обработки данных при СШП зондировании восходит к технологии синтезирования апертуры [1-2] и методу миграции, при которой все зарегистрированные в различных точках решетки \mathbf{p}_j СШП сигналы суммируются в фазе для каждой задаваемой точки фокусировки \mathbf{r} с коррекцией существующего запаздывания.

$$F(\mathbf{r}) = \sum_j S(\mathbf{p}_j, t = 2 \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{p}_j|}{c}).$$

Точки излучения-приема могут располагаться произвольно, в том числе по окружности или поверхности цилиндра. В приближении однократного рассеяния, когда излучается сигнал $S_0(t)$, и принятый локационный сигнал формируется как

$$S(\mathbf{p}_j, t) = k_0^2 \iiint_V S_0(t - 2 \frac{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{p}_j|}{c}) \frac{\Delta \varepsilon(\mathbf{r}_1)}{(4\pi |\mathbf{r}_1 - \mathbf{p}_j|)^2} (d^3 \mathbf{r}_1),$$

можно записать

$$F(\mathbf{r}) = \iiint_V \Delta \varepsilon(\mathbf{r}_1) Q(\mathbf{r}_1; \mathbf{r}) (d^3 \mathbf{r}_1).$$

Здесь функция

$$Q(\mathbf{r}_1; \mathbf{r}) = \sum_j S_0(t = 2 \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{p}_j|}{c} - 2 \frac{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{p}_j|}{c}) \frac{k_0^2}{(4\pi |\mathbf{r}_1 - \mathbf{p}_j|)^2}$$

играет роль аппаратной функции системы, т.е. отклика на точечную неоднородность. При достаточном объеме зарегистрированных данных и

коротких зондирующих импульсах эта функция приближается к «размазанной» δ -функции:

$$Q(\mathbf{r}_1; \mathbf{r}) \sim \delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}),$$

и тогда приближенно можно считать, что

$$\Delta \varepsilon(\mathbf{r}_1) \sim F(\mathbf{r}_1).$$

Эта запись представляет собой приближенное решение задачи томографии.

Сразу заметим, что описанное выше решение представляет собой обратную фокусировку поля, при которой образуется некое интерференционное поле, имеющее максимумы в точках истинного положения точек рассеяния. В иных точках поля будут складываться с произвольной фазой, т.е. там будут наблюдаться более низкие значения сфокусированного поля. Результат тем лучше, чем больше независимых слагаемых участвует в фокусировке. Записанное решение обладает исключительной простотой, но реализация его требует больших временных затрат, поскольку все суммирование сигналов приходится делать для каждой точки фокусировки заново.

При зондировании через преграду у отраженного сигнала возникает задержка, связанная с прохождением им диэлектрического слоя. Величина задержки будет зависеть от параметров диэлектрического слоя: - толщины и диэлектрической проницаемости. Кроме того, задержка будет меняться при зондировании под различными углами. Не учет этой задержки при восстановлении радиоизображения объекта может привести к его искажению и ухудшению разрешающей способности. Таким образом, перед проведением томографической реконструкции необходимо оценить параметры преграды, а именно: толщину d и коэффициент преломления n , который связан с диэлектрической проницаемостью по формуле $n = \sqrt{\varepsilon}$. Далее, на основе полученных оценок требуется провести коррекцию в алгоритме фокусировки принятых сигналов

Авторами работы была разработана методика нахождения этих параметров при двухпозиционном зондировании с односторонним доступом (рис. 1).

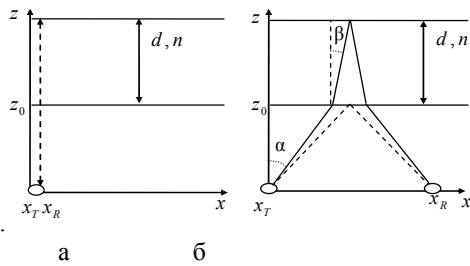


Рис. 1. Схемы зондирования преграды при совмещенных приемнике и передатчике (а) и разнесенных (б)

Определение параметров преграды d и n в приближении геометрической оптики (ГО) сводится к решению следующей системы уравнений [3]:

$$\begin{cases} \tau_1 = 2 \left(\frac{z_0}{c \cos(\alpha)} + \frac{dn}{c \cos(\beta)} \right); \\ \tau_2 = 2 \left(\frac{z_0 + dn}{c} \right). \end{cases}$$

Здесь τ - время регистрации, отраженного от задней стенки преграды, сигнала, α, β - углы падения и преломления соответственно. Первое уравнение записано в случае разнесенных приемника и передатчика, второе – совмещенных.

Для решения данной системы уравнений необходимо знать угол падения, который можно найти из уравнения путем исключения β :

$$\frac{x_T + x_R}{2} = z_0 \operatorname{tg}(\alpha) + d \operatorname{tg}(\beta)$$

Поскольку для определения параметров преграды использовалось приближение ГО, то необходимо обосновать его применение для случая СШП зондирования. С этой целью в программной среде CST Studio было смоделировано зондирование диэлектрической преграды СШП импульсом длительностью 0.2 нс по схеме, представленной на рис. 1. Параметры преграды задавались $d=0.1$ м и $n=1.581$ для всех частот сигнала. Приемники находились на расстоянии 3 и 20 см от излучателя.

Также в среде MathCad моделировалась аналогичная задача, но в приближении ГО. Результаты численного моделирования представлены на рис. 2.

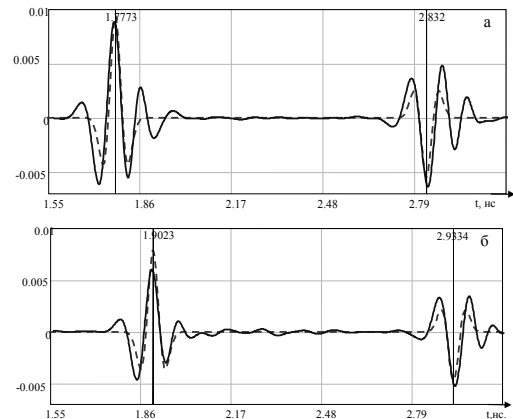


Рис. 2. Результаты решения прямой задачи с использованием CST Studio (сплошная линия) и в приближении ГО (пунктирная линия) в случае совмещенных приемнике и передатчике (а); при разнесенном приеме (б)

Сплошной линии соответствует решение прямой задачи в с MathCad, пунктирной – в CST Studio.

По полученным данным были рассчитаны следующие задержки; 1.029 нс в приближении ГО и 1.037 нс при моделировании в CST Studio. По найденным задержкам были рассчитаны искомые параметры преграды: $n = 1.582$; $d = 0.1$. Таким образом, использование приближения ГО обеспечивает определение параметров преграды с погрешностью менее 0.1 %.

На основании разработанного алгоритма проводилось 2D численное моделирование решения обратной задачи по восстановлению формы плоского экрана с отверстием посередине. При этом моделировалась работа решетки состоящей из 16 приемников, линейно распределенных по апертуре, и 2 передатчиков по краям решетки. Апертура решетки составляла 1.2 м. Экран находился на расстоянии 1 м от решетки за диэлектрической преградой с параметрами $d=0.1$ м и $n=1.581$. На рис. 3 представлены результаты восстановления сечения экрана без коррекции (а) и с коррекцией запаздывания в слое (б). Размер сетки на графике составил 4 см.

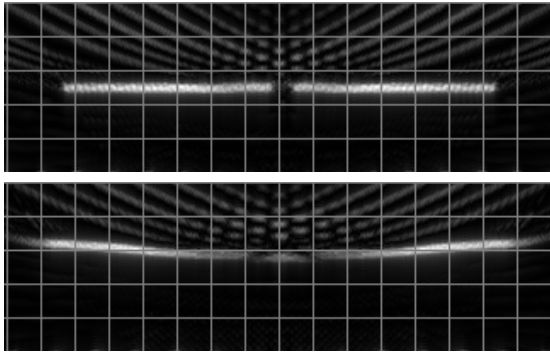


Рис. 3. Восстановленное при имитационном моделировании радиоизображение сечения экрана с отверстием без учета коррекции (а) и при коррекции запаздывания в слое (б)

Из графиков видно, что если не учитывать задержки в слое, то при фокусировке экран становится выгнутым, а границы отверстия посередине сильно размыты. Учет коррекции позволяет устранить эти искажения, а также повышает разрешение радиоизображения.

В большинстве случаев задача зондирования за преградами сводится к обнаружению подвижных объектов. Такие задачи возникают при отыскании людей под завалами или получении информации о местоположении и количестве террористов в соседнем помещении за стеной. В этом случае сигналы, отраженные от неподвижных объектов будут являться помехой и их нужно отфильтровать. Авторами использовался дифференциальный подход, в котором фильтрация сигналов от неподвижных объектов проводилась на основе разностных данных о регистрации сигналов в соседние периоды времени.

$$dS(t, T_i) = S(t, T_i) - S(t, T_{i-1}),$$

где $dS(t, T_i)$ – фильтрованный сигнал, $S(t, T_i)$ – регистрируемый сигнал, $S(t, T_{i-1})$ – сигнал, принятый в предыдущий период времени.

Для проверки предложенного подхода был проведен натурный эксперимент (рис. 4). Зондирование проводилось с использованием синтезирования апертуры линейной антенной решетки (рис. 4-1). За диэлектрической преградой (рис. 4-2) перемещался цилиндр вдоль направления, указанного стрелкой (рис. 4-7).

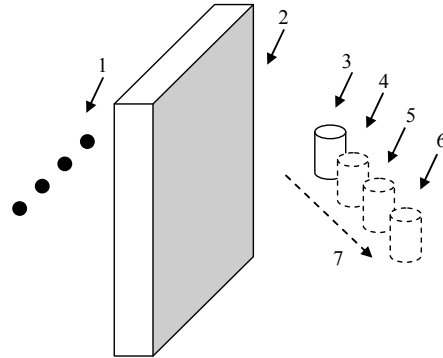


Рис. 4. Схема проведения натурного эксперимента с движущимся тестовым объектом

В положении 4, объект удалился от первоначального на 6 см и одновременно сдвинулся вправо на 7.5 см. При перемещении в положения 5 и 6, смещение составило 5 см.

Рассчитанные результаты эксперимента представлены на рис. 5. Размер каждой клетки данной томограммы равен 5 см.

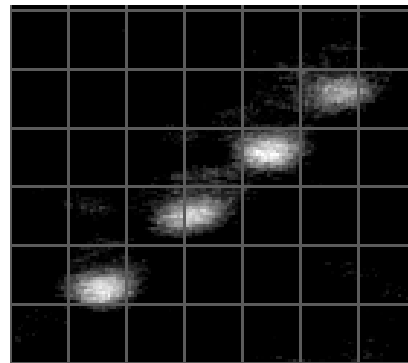


Рис. 5. Визуализация движения объекта

Таким образом, положение движущегося тестового объекта определяется вполне достоверно, а сигналы, отраженные от неподвижных объектов успешно фильтруются.

В случаях, когда человек неподвижен, судить о его наличии за преградой можно по движению грудной клетки либо брюшной полости. Рассмотрим рис. 6. Сигнал, отраженный от грудной клетки на выдохе S_2 , отличается от сигнала, отраженного на вдохе S_1 , временной задержкой $T = 2\Delta x/c$, где Δx – перемещение грудной клетки при вдохе/выдохе.

Для выделения колебаний, характерных для дыхания человека, необходимо преобразовать полученные, при СШП зондировании, данные. Рассмотрим спектры отраженных сигналов. Комплексные амплитуды спектров, принятых в соседние периоды времени, сигналов будут

отличаться друг от друга лишь множителем $\exp(i\omega T)$:

$$S_2(\omega) = S_1(\omega) \exp(i\omega T)$$

Умножим спектры принятых сигналов $S_i(\omega)$ на комплексно сопряженный спектр $S_1(\omega)^*$, получим:

$$S_i(\omega)S_1(\omega)^* = |S_i||S_1| \exp(i[\varphi_i - \varphi_1]) = |S_i||S_1| \exp(i\omega T).$$

Выделим фазу из полученного выражения, тогда

$$T_i = \frac{\arg[S_i(\omega)S_1(\omega)^*]}{\omega}, \quad \omega = 2\pi f,$$

где f – значимая частота из спектра, принятого сигнала.

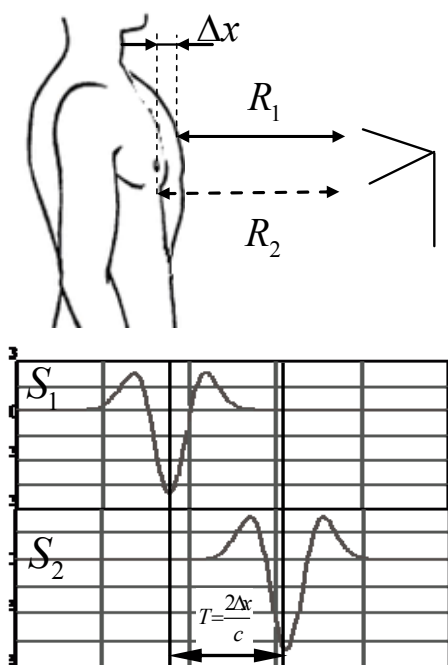


Рис. 6. Регистрация колебаний, характерных для дыхания человека

Авторами был поставлен эксперимент по определению дыхания человека. Стена, выполненная из газобетонных блоков, толщиной 10 см., находилась на расстоянии 20 см. от приемопередающей системы. За стеной неподвижно сидел испытуемый и дышал, сначала нормально, затем часто. Измерения проводились в течение 60 с. Регистрация принятых СШП импульсов производилась 2 раза в секунду. Таким образом, за одно измерение реализовывалось 120 осциллограмм. На рис. 7 показаны примеры 120 осциллограмм отраженных СШП сигналов, обработанных с использованием метода фильтрации

постоянных составляющих. Разным уровням сигнала соответствуют разные градации серого цвета. Горизонтальная развертка соответствует временной форме сигнала, а вертикальная – моменту регистрации отраженного сигнала.

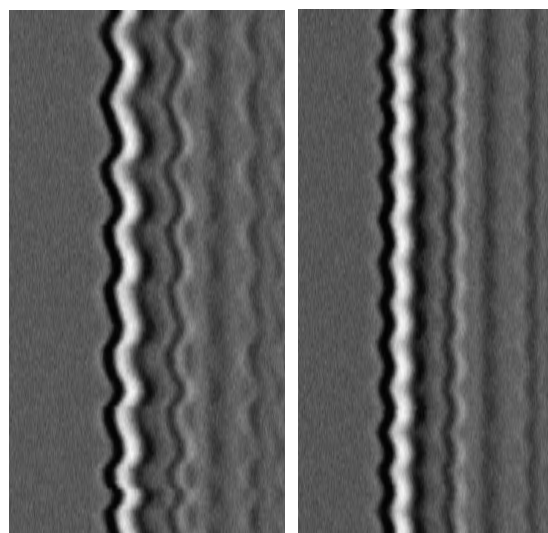


Рис. 7. Осциллограммы СШП сигналов от человека с нормальным (а) и учащенным (б) дыханием

В результате обработки экспериментальных осциллограмм были выделены колебания грудной клетки человека (рис.8).

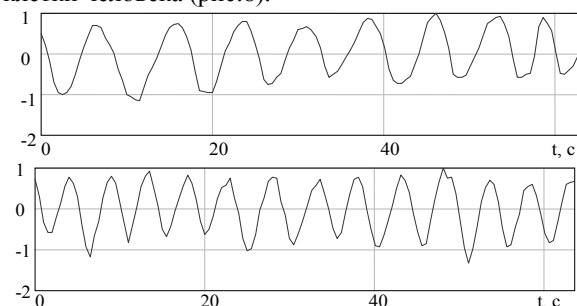


Рис. 8. Колебания грудной клетки при нормальном и учащенном дыхании

Спектры полученных колебаний представлены на рис. 9.

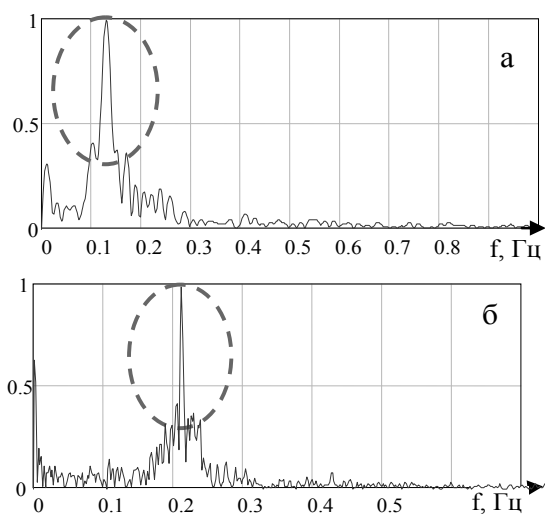


Рис. 9. Экспериментально полученные спектры нормального (а) и учащенного (б) дыхания человека при зондировании через преграду

Результаты исследований позволяют использовать разработанные алгоритмы в работе по созданию действующей модели СШП томографа движущихся объектов за преградами и поиска людей под завалами.

Работа выполнена при поддержке Российских программ АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» мероприятие 2, проект № 2.1.2/12874, а также ФЦП в рамках мероприятий 1.1. (ГК № 14.740.11.0076), 1.2.2 (НК-104П/2) и 1.3.1 (НК-181П/6).

ЛИТЕРАТУРА

1. Якубов В.П., Склярчик К.Г., Пинчук Р.В., Суханов Д.Я., Булавинов А.Н., Бевецкий А.Д. Радиоволновая томография скрытых объектов для систем безопасности // Известия высших учебных заведений. Физика. 2008, № 10. - С. 63-79.
2. Якубов В.П., Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н. Сверхширокополосное зондирование за диэлектрическими преградами // Известия высших учебных заведений. Физика. 2010, № 9. - С. 10-16.
3. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1957. – 503с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ И ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

Буллер А.И., Бабилов С.А., Москалев Ю.А., Кулешов В.К.

Томский политехнический университет», г. Томск

E-mail: Bullerai@yahoo.com

В настоящее время в связи с развитием методов неразрушающего контроля все более актуальными становятся исследования характеристик люминесцентных преобразователей.

Первичным преобразователем в радиационных интроскопах являются люминесцентные экраны, которые представляют собой слой микрокристаллического люминофора толщиной 0,1-0,5 мм нанесенные на подложку из стекла, пластика и металлов.

Для контроля изделий микроэлектроники и объектов, поверхность которых имеет топографические изменения структуры вплоть до нанометров, с использованием рентгеновского излучения и систем цифровой радиографии исключительно высокие требования предъявляются к качеству люминесцентных преобразователей излучения. Это необходимо, для того чтобы исключить влияние неоднородностей люминесцентных преобразователей на качество рентгеновского изображения. При разработке люминесцентных преобразователей одной из основных задач является увеличение контраста изображения и увеличения дефектоскопической чувствительности. По большей части эти характеристики определяются однородностью люминесцентного слоя и наличием структурных дефектов.

Разрешающая способность люминесцентных преобразователей достаточно сложным образом зависит от толщины и размера структурных неоднородностей люминесцентного слоя. При этом структурные неоднородности вносят основной вклад в снижении дефектоскопической чувствительности интроскопов, поскольку создают локальные, пространственно модулированные неоднородности поглощения излучения и, соответственно, распределения яркости. Например, при толщине люминесцентного слоя преобразователя излучения 100 мкм для обеспечения контрастной чувствительности до 0,1% структурные неоднородности должны быть более 1 мкм. Существующие методы изготовления люминесцентных преобразователей, в частности, экранов из поликристаллических люминофоров не позволяют обеспечить такой точности и отсутствия структурных шумов.

Как следует из приведенных результатов исследований, видно, что структурные неоднородности люминесцентных экранов составляют порядка 100 мкм для CsI(Tl).

Величина указанных неоднородностей определяется размером зерен люминофоров и не позволяет получить высокую дефектоскопическую чувствительность систем интроскопии использующих подобные преобразователи излучения. При этом обычные оптические микроскопы не позволяют эффективно регистрировать качество поверхности кристаллов, поэтому актуальным становится применение электронного микроскопа для исследования поверхности.

Нами проводились исследования по оценке формы и размеров неоднородности структуры кристаллов в порошках и экранах и рентгенолюминесцентного стекла $\text{Li}_2\text{O}-\text{BaO}-\text{SiO}_2$ на предмет обнаружения фазы на границе «стекло-кристалл», определение их формы и размеров, плотности распределения по экрану, влияние на люминесцентные свойства стекла. Исследования проводились с применением метода растровой микроскопии.

Одной из часто встречающихся причин ухудшения качества изображения является отчетливо видимая глазом зернистость или пятнистость изображения, обусловленная структурой экрана. Она приводит к увеличению порогового контраста $K_{\text{пор}}$ и ухудшению различаемости или к полному исчезновению на изображении мелких и малоконтрастных деталей, таких, как, например, камни в почках и желчном пузыре или пузырьки газа в сварном шве.

Размер зерен люминофора прямого влияния на структурную зернистость не оказывает, так как обычно он лежит за пределами того, что глаз в состоянии различить. Причина ее состоит в образовании зернами крупных агрегатов. Это явление особенно неблагоприятно сказывается на качестве тонких экранов ($g = 20-30 \text{ мг}\cdot\text{см}^{-2}$), так как в этом случае наиболее вероятно образование промежутков между агрегатами, не закрытых верхними слоями люминофора [2].

Впрочем, видимая невооруженным глазом зернистость не обязательно означает наличие агрегатов, размер которых превышает пороговое значение, отвечающее предельной остроте зрения (100 мкм). Появление зернистости может быть также следствием статистически неоднородного распределения агрегатов, подобного пространственной неоднородности в распределении квантов рентгеновского излучения.

Расчет показывает, что в случае CaWO_4 экранов со средним размером зерен $\sim 7 \text{ мкм}$ уже образование ими конгломератов размером 39—40

мкм может привести к различаемой глазом пятнистости, которая растет по мере уменьшения нагрузки люминофора и соответствующего уменьшения числа конгломератов.

Возникновение агрегатов связано с некоторыми особенностями технологии изготовления экранов, которые мы здесь кратко рассмотрим, в основном в той мере, в какой это имеет отношение к качеству изображения [3].

Образование крупных скоплений слипшихся друг с другом зерен может произойти при получении суспензии по двум причинам. Одна из них состоит в неудовлетворительном диспергировании порошка в растворе связующего, вследствие чего агрегаты, образовавшиеся в сухом состоянии, не распадаются на составляющие их зерна. Вторая причина заключается в слипании зерен (флокуляции) под действием поверхностных сил после диспергирования. Образующиеся при этом скопления называются флокулятами.

Следует стремиться к выбору таких связующих веществ, которые адсорбируются на поверхности зерен люминофора, способствуя их разделению, т. е. играют роль защитного коллоида. Иногда для лучшего смачивания и диспергирования люминофора и для повышения агрегативной устойчивости суспензии в нее вводят специальные поверхностно-активные вещества — эмульгаторы [1].

Большую роль играют природа люминофора и состояние его поверхности. Например, в растворах ацетобутиратцеллюлозы CaWO_4 , BaSO_4 —и $\text{Y}_2\text{O}_3\text{S}$ —Tb-люминофоры обладают высокой агрегативной устойчивостью и хорошей укрывистостью, т. е. способностью давать равномерные покрытия, тогда как ZnS —Ag обнаруживает склонность к флокуляции, приводящую к заметной структурной зернистости изображений. В то же время применение кремний органического лака дает возможность получить вполне удовлетворительные по этому показателю экраны и на основе ZnS —Ag.

Важное значение имеет и форма зерен. Замечено, что пластинчатые и игольчатые кристаллы обладают большей склонностью к флокуляции, чем сферические зерна. Особенно трудно предотвратить слипание зерен неправильной формы с сильно развитой поверхностью. Такие зерна получаются при дроблении спека, образующегося при синтезе люминофора без плавня. Поэтому следует отдавать предпочтение прокаливанию шихты с плавнем, предотвращающим спекание и обеспечивающим получение хорошо огранных и достаточно однородных по размерам зерен [1].

В самом определении наноматериалов заложено условие того, что хотя бы один линейный размер (геометрический или структурный) лежит в наномасштабе. Поэтому, для изучения их морфологии и структуры не подходит

ряд привычных и традиционных методов таких как оптическая микроскопия, макромеханические испытания и т.д. Для преодоления большинства трудностей исследования наноматериалов применяется растровая (сканирующая) электронная микроскопия (РЭМ).

В растровых электронных микроскопах электронный луч, сжатый магнитными линзами в тонкий (1-10 нм) зонд, сканирует поверхность образца, формируя на ней растр из несколько тысяч параллельных линий. Возникающее при электронной бомбардировке поверхности вторичные излучения (эмиссия вторичных электронов, рассеяние первичных электронов, характеристическое рентгеновское излучение, катодолюминесценция и др.) регистрируются различными детекторами и преобразуются в яркость пикселей на мониторе. Развертки лучей в колонне РЭМ и в мониторе компьютера синхронны, поэтому на экране последнего появляется изображение, представляющее собой картину распределения интенсивности одного из вторичных излучений по сканируемой площади объекта. Увеличение РЭМ определяется как $M = L/l$, где L и l - длины линий сканирования на экране монитора и на поверхности образца.

Выбор регистрируемого вторичного излучения обусловлен задачей исследования. Основной режим работы РЭМ - регистрация вторичных электронов (ВЭ). Поскольку интенсивность эмиссии ВЭ сильно зависит от угла падения электронного луча на поверхность, получаемое изображение весьма близко к обычному макроскопическому изображению рельефа объекта, освещаемого источником света; иначе говоря, формируется топографический контраст. Эмиссия ВЭ отличается наибольшей интенсивностью по сравнению с другими вторичными излучениями. Кроме того, в этом режиме достигается максимальное разрешение.

При проведении исследований нами были получены изображения поликристаллических преобразователей излучения.

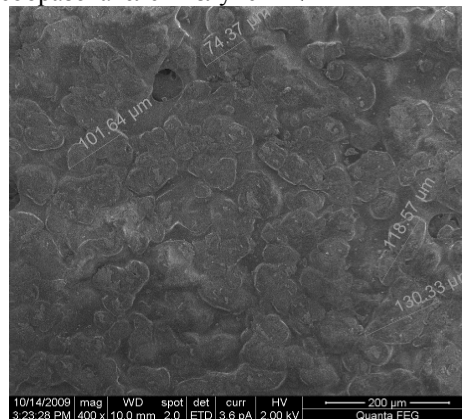


Рис. 1. Структура поликристаллического CsI(Tl) образец № 001 с размерами зерна при 400-кратном увеличении

Описание образца № 001- кристаллы размером 40-50 мкм образуют конгломераты округлой формы размером до 100 мкм, более интенсивное свечение наблюдается на границе конгломератов, центры конгломератов – темные.

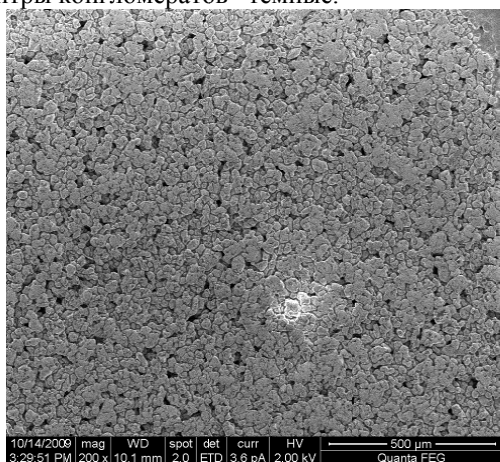


Рис. 2. Структура поликристаллического CsI(Tl) образец № 002 при 200-кратном увеличении

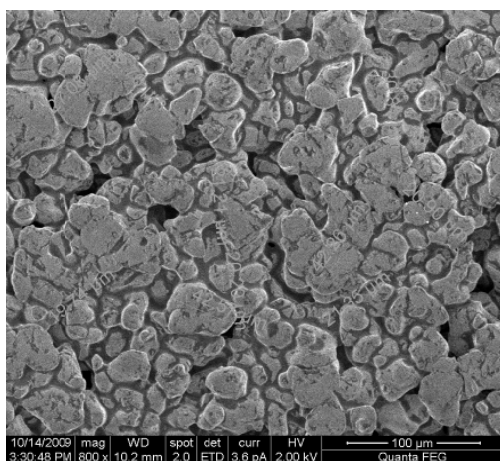


Рис. 3. Структура поликристаллического CsI(Tl) образец № 002 с размером зерна при 800-кратном увеличении

Описание образца № 002-кристаллы размером ~20 мкм, форма граненая, плотная упаковка, конгломераты меньше, границы не подчеркнуты, светится весь объем кристаллов.

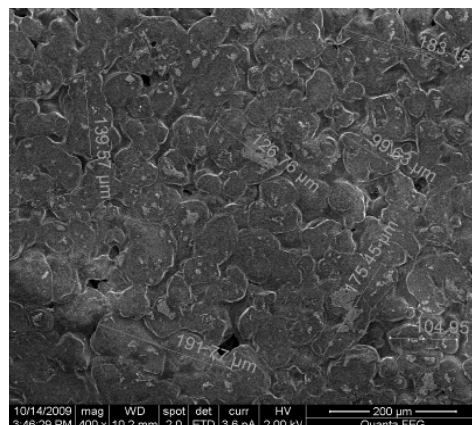


Рис. 4. Структура поликристаллического CsI(Tl) образец № 003 при 400-кратном увеличении

Описание образца № 003-кристаллы округлые, размеры конгломератов до 200 мкм, четкое свечение границ.

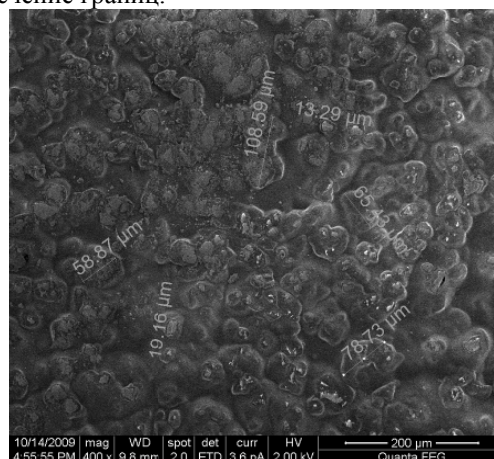


Рис. 5. Структура поликристаллического CsI(Tl) образец № 005 при 400-кратном увеличении

Описание образца № 005-кристаллы округлые размером 20 мкм, конгломераты до 50-100 мкм, светятся границы и центры конгломератов; экран изготовлен из более мелкозернистого люминофора с заливкой на стекло.

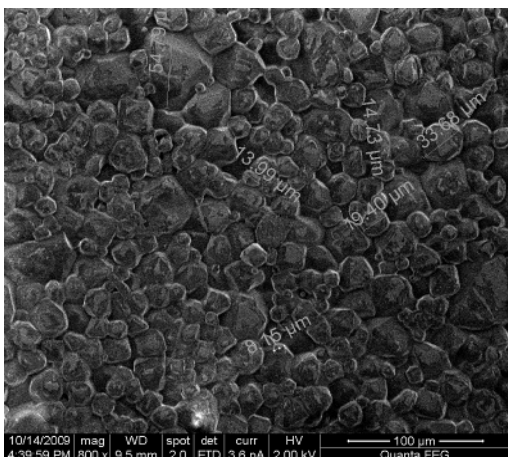


Рис.6. Структура поликристаллического CaWO_4 ЭУ-В4П образец № 009 при 800-кратном увеличении

Описание образца № 009 -граненые кристаллы, размер 20-50 мкм, светятся границы, плотная упаковка.

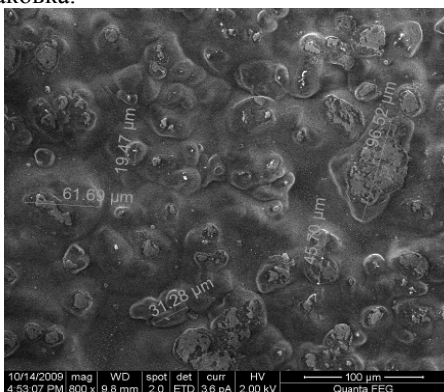


Рис. 7. Структура поликристаллического CsI(Tl) образец № 006 при 800-кратном увеличении

Описание образца № 006 -изображение кристаллов более контрастное, размер 20 мкм, светятся границы, размер светящейся области на границе 1 мкм.

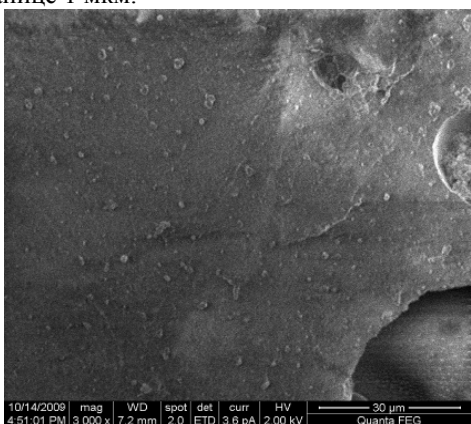


Рис.8. Структура поликристаллического CsI(Tl) с эпоксидным компаундом образец № 007 при 3000-кратном увеличении

Описание образца № 007-кристаллы наблюдаются как темные пятна, ровное свечение связующего видимо имеет место избыток связующего с большим показателем преломления.

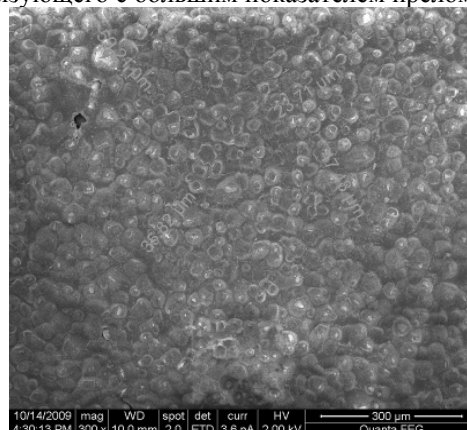


Рис. 9. Структура поликристаллического ZnCdS-Ag образец № 011 при 300-кратном увеличении

Описание образца № 011-кристаллы округлые, размер 20-50 мкм, светятся в объеме, упаковка плотная.

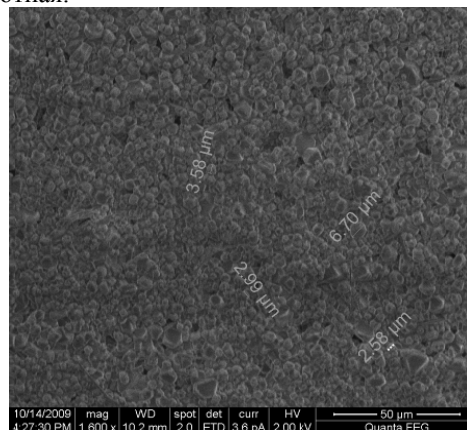


Рис.10. Структура поликристаллического $\text{Cd}_2\text{O}_2\text{S}$ образец № 012 при 300-кратном увеличении

Описание образца № 012 -кристаллы размером 3-7 мкм, светятся в объеме, упаковка плотная, но имеются рыхлоты.

По результатам исследования изображений поверхности поликристаллических экранов может быть сделан вывод о весьма четкой корреляций между характеристиками структуры экранов и разрешающей способностью. В частности, установлено, что кристаллы и образованные ими конгломераты в объеме экрана действуют как микросветоводы с передачей света рентгенолюминесценции из объема кристалла на его границы. При этом эффективность светопередачи зависит от вида связующего, его количества, показателя преломления и способов изготовления экранов. Например, при малом количестве связующего и малом показателе преломления наблюдается интенсивное свечение

границ кристаллов и образованных ими конгломератов (образцы 001, 003, 005). В тоже время, в образце 007 с большим количеством плотного связующего наблюдается ровное, слабое свечение связующего при более темных изображениях кристаллов. Также наблюдается четкая взаимосвязь между размером кристаллов и разрешающей способностью. Так образец экрана 012 при размере кристаллов 3-7 мкм имеет разрешение до 4 пар лин/мм, а экраны образцов 001, 002 с размерами кристаллов 20-30 мкм имеют разрешение 2-3 пар лин/мм. Кроме того, следует предположить существенное влияние структуры экранов на контраст рентгеновского изображения. Так на примере сравнения образцов 005 и 006 следует, что экран без подложки имеет более высокий контраст изображения. Однако, наиболее распространенные люминофоры, используемые в преобразователях изображений - оксисульфид гадолиния ($Gd_2O_2S:Tb$) и иодид цезия ($CsI:Tl$) нанесенные методом полива на пластиковую подложку, имеют относительно невысокую разрешающую способность порядка 2-3 пар лин./мм это обусловлено тем что при поливе не достигается высокая плотность упаковки зерен. В настоящее время в связи с развитием видеокамер фотодиодных матриц высокого разрешения возникает потребность в люминесцентных экранах высокого разрешения с разрешающей способностью до 10 пар лин/мм и выше. При выполнении работ была проведена серия опытов по изготовлению экранов способом осаждения. Было изготовлено несколько опытных образцов люминесцентных преобразователей ионизирующего излучения высокого разрешения с различными материалами в качестве подложки, нами были выбраны такие материалы как стекло и белый пластик. А так же опытным путем было выбрано необходимое количество люминофора для обеспечения достаточного качества толщины слоя и его равномерности.

Измерение разрешающей способности проходило с помощью рентгеновского аппарата РУП 150 с фокусным пятном размером 0,2 мм а также ПЗС камеры при помощи эталона пространственного разрешения с максимальной разрешающей способностью до 5 пар. лин/мм. Полученные результаты обрабатывались с помощью специализированного программного продукта. Разрешающая способность, т.е. максимальная частота, при которой изображения штрихов мира 100%-го контраста еще воспринимаются раздельно, тесно связана с нерезкостью изображения и частотно-контрастной характеристикой. При прочих равных условиях разрешающая способность в первом приближении обратно пропорциональна нерезкости. Но, кроме того, она определяется и пороговым контрастом, который, в свою очередь, зависит от контрастной чувствительности глаза и от равномерности фона,

на котором рассматривается изображение: если фон имеет зернистую или пятнистую структуру, то возможности различия мелких деталей уменьшаются.

Разрешающая способность в нашем случае определяется визуально с помощью прямоугольных свинцовых миш. Известно, что разрешающая способность экранов для рентгенографии и флюорографии при визуальном измерении ее методом контрастной фотографии составляет около 5 пар. лин/мм, визуально при яркости свечения около 2 кд/м^2 выявляют от 3 до 4 пар. лин/мм, а при средней для рентгенографии яркости $0,01 \text{ кд/м}^2$ – не более 1 пар. лин/мм. Приведенные данные иллюстрируют тот известный факт, что различаемость деталей при рентгенографии с использованием обычного экрана лимитируется контрастной чувствительностью глаза.

Изготовленные опытным путем экраны имели разрешающую способность порядка от 5 до 6 пар. лин/мм, что свидетельствует о их достаточно высоком качестве и перспективности метода осаждения для изготовления экранов для радиационных интроскопов.

В результате использованных в данной работе методов растровой и оптической микроскопии измерения структуры люминесцентных преобразователей были получены сведения о технологическом процессе изготовления люминесцентных экранов для построения рентгеновского изображения в таких областях как медицина, дефектоскопии, таможенный контроль.

Применение методов растровой (во вторичном электронном пучке) и оптической микроскопии позволило увеличить объем знаний для более глубокого понимания технологии изготовления преобразователей излучения, распределения зерна люминофора по объему кристалла, механизмов и закономерностей испускания света в зернах и на границах люминофора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурвич А. М. «Введение в физическую химию кристаллофосфоров», Учебное пособие для вузов. М., «Высшая школа», 1971, 336 с с илл.
2. Шварц К.К., Алукер Э.Д., Кристопсон Я.Ж., Плявина И.К., Лайзан В.Б., Люшина А.Ф. «Люминесценция и дефекты ионных кристаллов», Радиационная физика V, Изд. «ЗИНАТНЕ», Рига, 1967.
3. Гурвич А. М. «Рентгенолюминофоры и рентгеновские экраны», М., Атоиздат., 1976, 152 с.

МОНИТОРИНГ И ДИАГНОСТИКА ДЕСТРУКТИВНЫХ ЗОН В ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД ПО ПАРАМЕТРАМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИГНАЛОВ И ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭМИССИИ

Беспалько А.А., Яворович Л.В., Федотов П.И., Бомбизов А.А.

Томский политехнический университет, Томск, пр. Ленина, 30, Россия,

E-mail:besko48@tpu.ru

Сложное структурно-текстурное строение реальных образцов горных пород приводит к неоднородному распределению деформаций и повреждений в их объеме уже на начальном этапе механического воздействия. Образующиеся при этом дефекты в виде микротрещин, первоначально локализируются в наименее прочных минералах, составляющих горную породу, а также на их контактах, границах пор и других дефектов. Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к эволюции системы, в процессе которой происходит локализация увеличивающихся дефектных областей, что в конечном итоге приводит к образованию в гетерогенной системе консолидированных блоков и неконсолидированных блочных систем [1]. В результате образования микротрещин и их роста, а также при формировании консолидированных блоков, может происходить: перенос заряда в устье трещин; колебания берегов трещины с мозаичной структурой зарядов акустическими импульсами, возникающими при зарождении и развитии других дефектов в объеме образца. Все это сопровождается испусканием электромагнитных сигналов (ЭМС), появление которых обусловлено изменением дипольных моментов дефектов, возникающих на различных этапах разрушения [2]. В этом случае параметры электромагнитных сигналов должны определяться размерами образующихся дефектов, прочностными, электрическими и магнитными характеристиками разрушаемой горной породы. Электромагнитные

сигналы могут возникать также вследствие прямого пьезоэлектрического эффекта при наличии в горной породе минералов, обладающих пьезоэлектрическими свойствами. Высокая чувствительность механоэлектрических преобразований к структурно-текстурным изменениям горных пород при деформировании, вследствие возникновения деструктивных зон с последующим их развитием до стадии разрушения, обуславливает пространственно-временное распределение электромагнитных сигналов. Сложная иерархическая структура горных пород приводит к тому, что на протяжении всего процесса деформирования изменяются параметры регистрируемого ЭМС. В связи с этим, важной задачей является установление амплитудно-частотных параметров ЭМС, которые характеризуют определенные этапы напряженно-деформированного состояния (НДС) горных пород и могут служить прогностическими признаками образования деструктивных зон и разрушения образцов горных пород.

Исследования амплитудно-частотных параметров электромагнитных сигналов при одноосном сжатии образцов горных пород проводились на установке и по методикам, описанным в [3]. Объектом исследования были выбраны образцы вмещающих горных пород Таштагольского рудника, представленные сиенитами, скарнами и диоритами, а также образцы кварцсодержащего диабаз.

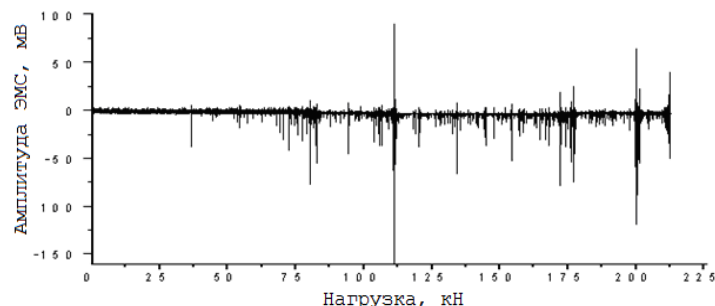


Рис.1. Изменения амплитуды электромагнитного сигнала в процессе одноосного сжатия образца кварцсодержащего диабаз

Кварцсодержащий диабаз использовали в качестве модельных образцов для выявления основных закономерностей в амплитудно-частотных спектрах ЭМС при одноосном сжатии. Содержащийся в образцах кварц обладает пьезоэлектрическим эффектом, при механическом

воздействии на который генерируется достаточно мощный электромагнитный сигнал. Подобные электромагнитные сигналы могут возникать и в процессе разгрузки кварцевых включений в зоне действия образующихся трещин и других нарушений сплошности. В нашем случае

воздействие на кварцевые включения осуществляется еще и акустическим сигналом, возникающим при раскрытии и движении трещин в процессе одноосного сжатия образца. Результаты моделирования появления электромагнитного отклика на внешнее акустическое воздействие в кварцсодержащих и слоистых горных породах приведены в работе [4]. На рис.1 приведена осциллограмма аналоговых ЭМС в процессе одноосного сжатия диабаз, записанная с помощью осциллографической

приставки PCS500, работающей в режиме самописца. Параллельно проводилась запись аналоговых сигналов цифровым запоминающим осциллографом TDS-2024B. В качестве приемника использовали емкостный датчик. Скорость нарастания сжимающих усилий составляла $(0,30 \pm 0,03)$ кН/с. На рисунке видно, что во время всего цикла сжатия изменяется амплитуда ЭМС, причем в зависимости от этапа нагружения образца происходит либо увеличение амплитуды, либо ее уменьшение. Анализ полученных результатов

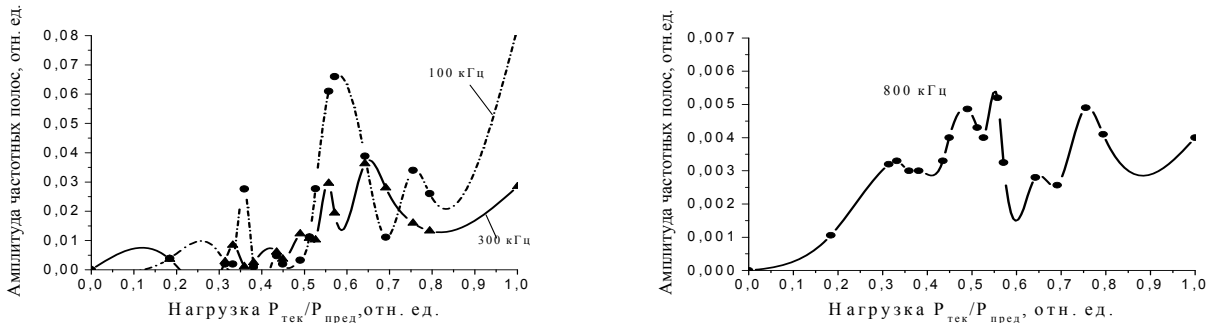


Рис.2. Зависимости изменения максимальной амплитуды частотных полос: а - 100 кГц и 300 кГц, б - 800 кГц от относительной нагрузки

показал, что наряду с амплитудой изменяется частота следования ЭМС и их спектр. На начальных этапах одноосного сжатия образца диабаз максимальная амплитуда спектра лежит в области 150 кГц. По мере увеличения нагрузки максимум спектра сдвигается в сторону больших частот и это продолжается до сжимающих напряжений, при которых происходит формирование очага разрушения. Дальнейшее увеличение нагрузки на этапе предразрушения приводит к смещению максимальной амплитуды частотной полосы в сторону меньших частот, при этом увеличивается амплитуда, как аналогового электромагнитного сигнала, так и амплитуда его спектральных полос. Для анализа изменения частотных характеристик ЭМС в период всего цикла сжатия были выбраны три значимые частотные полосы: 100 кГц, 300 кГц и 800 кГц. На рис. 2 (а,б) приведены зависимости изменения максимальной амплитуды этих частотных полос от относительной нагрузки, рассчитанной как отношение текущей нагрузки ($P_{тек}$) к предельной ($P_{пред}$), что позволило по изменениям спектральных характеристик ЭМС выявлять этапы напряженно-деформированного состояния для всех образцов, независимо от их предельной прочности.

В работах [3] было показано, что по интенсивности ЭМС выявляются этапы, соответствующие определенной стадии трещинообразования в одноосно сжимаемом образце горной породы. Так активный рост микротрещин и увеличение их плотности происходит на этапе формирования очага

разрушения, который соответствует нагрузке, в среднем, $0,4 \div 0,8 P_{пред}$. Экспериментально доказано [5], что диапазон нагрузки, при которой происходит формирование очага разрушения, зависит от прочности образцов. Чем прочнее порода, из которой вырезан образец, тем ближе к предельной прочности происходит формирование очага разрушения. Это объясняется тем, что более прочные образцы после начального этапа смыкания существующих трещин и пор деформируются почти линейно-упруго, что подтверждается зависимостями «напряжение-деформация». При таком деформировании горная порода может длительное время накапливать упругую энергию. На рис.2 видно, что для кварцсодержащего диабаз максимальные амплитуды частотных полос 100 кГц и 300 кГц лежат в интервале нагрузок $0,5 \div 0,75 P_{пред}$. Это соответствует экспериментальным данным, приведенным в [3]. Увеличение максимальной амплитуды ЭМС при нагрузке $0,3 \div 0,4 P_{пред}$ характеризует подготовку этапа формирования очага разрушения, возникновение которого обусловлено локальным трещинообразованием в менее прочных минералах или в ослабленных дефектами участках породы. Изменения максимальных амплитуд на частоте 800 кГц (рис.2б) примерно повторяют закономерности, приведенные на рис.2а. На нагрузке $0,3 \div 0,4 P_{пред}$ (рис.2б) наблюдается небольшое увеличение, что подтверждает произошедшее разрушение. Этап формирования очага разрушения по этой зависимости наступает с нагрузки $0,45 P_{пред}$, что несколько раньше, чем на приведенных графиках

для более низких частот спектра ЭМС (рис.2а). Это означает, что при достижении определенной нагрузки сначала появляются небольшие по размерам трещины, генерирующие ЭМС высокой частоты. Слияние их в трещины больших размеров или трещины отрыва сопровождается генерированием ЭМС на более низких частотах, поэтому на спектральных характеристиках мы видим увеличение максимальной амплитуды ЭМС во всем частотном диапазоне. Сравнение зависимостей, приведенных на рис.2а и 2б, показало, что на частотах 100 и 800 кГц явно выделен еще один максимум амплитуд, соответствующий нагрузкам $0,7 \div 0,8 P_{\text{пред}}$, в то

время как на частоте 300 кГц он практически отсутствует. В то же время на частоте 300 кГц в интервале $0,45 \div 0,7 P_{\text{пред}}$ присутствуют промежуточные максимумы. Появление этих максимумов на частоте 300 кГц подтверждает, что развитие очага разрушения происходит путем слияния более мелких трещин. В то же время наличие максимума на нагрузках $0,7 \div 0,8 P_{\text{пред}}$ свидетельствует о том, что процесс разрушения образца горной породы продолжается за счет интенсивной подпитки сформированного очага новыми образующимися трещинами. В конечном итоге, при достижении предела прочности образца, происходит его глобальное



Рис. 3. Изменение усредненной амплитуды ЭМЭ в полосе частот $1 \div 100$ кГц для образца вмещающей породы

разрушение, и поступление ЭМС прекращается. Сравнительный анализ параметров электромагнитных сигналов при изменении напряженно-деформированного состояния в процессе одноосного сжатия был продолжен с использованием образцов вмещающих горных пород, отобранных на Таштагольском железорудном месторождении и представленных скарнами и сиенитами. Объединение в одну группу вмещающих пород для проведения сравнительного анализа обусловлено тем, что эти породы по своим электрическим свойствам примерно одинаковы. Исследуемые образцы изготавливали из кернов диаметром $4 \cdot 10^{-2}$ м высотой $8 \cdot 10^{-2}$ м, торцевые поверхности которых подвергались шлифовке и выравнивались до параллельности с расхождением менее 0.005 рад, чтобы при одноосном сжатии избежать нежелательных тангенциальных напряжений. Одноосное сжатие производилось вдоль главной оси образцов линейно до разрушения. Скорость изменений усилий прессом, так же как и в предыдущих экспериментах, поддерживалась для всех образцов равной $(0,30 \pm 0,03)$ кН/с. В процессе одноосного сжатия измерялась нагрузка, прикладываемая к образцу, продольная деформация и предельная нагрузка разрушения. Это позволило оценивать изменения напряженно-деформированного состояния горных пород на

всех этапах сжатия. Исследуемые образцы отличались минералогическим составом и особенностями структурно-текстурного строения, поэтому для каждого из них характерна своя предельная нагрузка разрушения и определенная зависимость продольной деформации от прикладываемого напряжения. На основании экспериментально полученных результатов для каждого образца определены этапы уплотнения и формирования очага разрушения и предшествующего разрушению. В начале сжатия, когда реализуется этап уплотнения, поверхностный слой образца, контактирующий с плитами пресса, имеет наименьшую сдвиговую устойчивость [5], обусловленную специфической структурой поверхностного слоя. На этом этапе происходят локальные разрушения при неупругом сжатии, вызванные шероховатостью поверхности торцов образца и смыканием открытых трещин и пор. Следующим этапом в эволюционной иерархии, который соответствует новому мезоуровню, является формирование очага (очагов) разрушения. В процессе непрерывно увеличивающейся нагрузки на этом этапе происходит формирование областей или кластеров повреждений, представляющих собой совокупность микротрещин различных размеров. Образующиеся кластеры повреждений распределяются по объему не случайным образом,

а в зависимости от структурно-текстурных особенностей конкретного образца и действующих механических напряжений, возникающих в процессе его деформирования. Этот этап можно охарактеризовать еще и как начало разрушения. На третьем этапе, с приближением к пределу прочности, происходит быстрое увеличение концентрации микротрещин, слияние кластеров повреждений и образование магистральных трещин. Этот этап носит название предразрушающий и соответствует нагрузке от 0,8 до $0,95 P_{\text{тек}}/P_{\text{пред}}$. На рис.3 приведено изменение

усредненной амплитуды электромагнитной эмиссии (ЭМЭ) для образца вмещающей породы, предельная прочность при сжатии которого составила 184 кН. Как показано ранее [2,3,4] электромагнитная эмиссия является следствием механоэлектрических преобразований в процессе деформирования горной породы. Одним из побуждающих факторов таких преобразований является акустическая эмиссия, возникающая при раскрытии трещин разных размеров, а также структура поверхности образца. В зависимости от этапа изменения НДС наблюдаются особенности

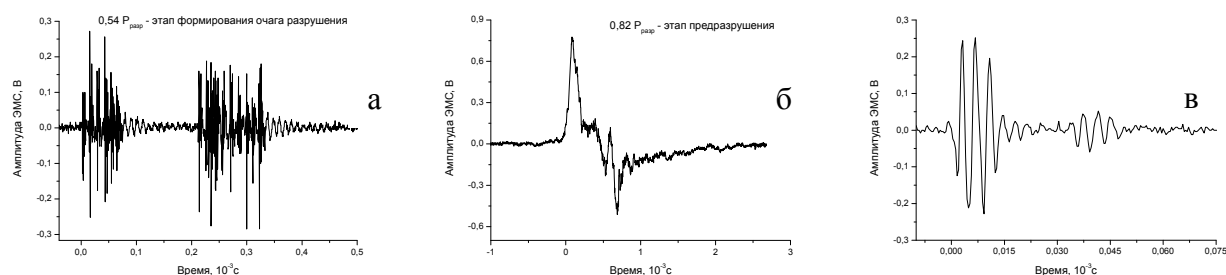


Рис. 4. Осциллограммы электромагнитных сигналов, зарегистрированные на этапах деформирования образцов горных пород: а – $0,54 P_{\text{разр}}$ – формирования очага разрушения; б - $0,82 P_{\text{разр}}$ – этап предразрушения; в - осциллограмма биения ЭМС на этапе формирования очага разрушения

ЭМЭ. Отчетливо выделяются: этап уплотнения до $0,2 P_{\text{пред}}$ и этап формирования очага разрушения в области $0,3 \div 0,5 P_{\text{пред}}$. В эксперименте при помощи емкостного датчика с предварительными усилителями тока и напряжения и запоминающего цифрового осциллографа TDS-2024 записывали аналоговые электромагнитные сигналы на различных этапах деформирования. В дальнейшем был проведен расчет амплитудно-частотных параметров ЭМС с использованием быстрого преобразования Фурье. На рис. 4 приведены

типичные осциллограммы ЭМС, зарегистрированные при деформировании образца горной породы на этапах формирования очага (очагов) разрушения и предшествующего фактическому его разрушению. На начальном этапе формирования очага разрушения частота ЭМС более высокая (рис. 4а), чем на этапе предразрушения образца (рис. 4б). Для ЭМС, отображенного на рис. 4а, основная частота лежит в пределах 100 кГц, 300 кГц и от 450 до 700 кГц. Такой разброс частот характеризует процессы

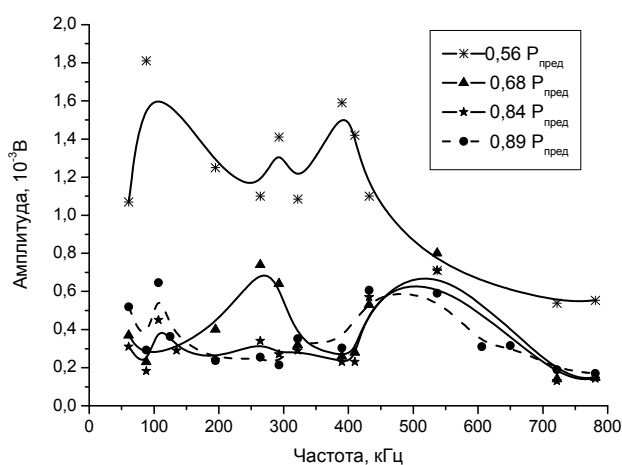


Рис.5. Изменения амплитудно-частотных параметров электромагнитных сигналов на определенных этапах деформирования образца скарна

интенсивного образования дефектов различного масштаба в образце, а это может происходить только на этапе формирования очага разрушения. На этом этапе появляются так же ЭМС (рис.4в), параметры которых обусловлены биениями. Нами в работе [6] было показано, что при деформировании образцов биение обусловлено не только разностью скоростей распространения акустического сигнала в составляющих горную породу минералах, но и набором близлежащих размеров механических осцилляторов. В процессе формирования очага разрушения при множестве вновь образующихся микро- и макротрещин существенно облегчается подбор осцилляторов с близкими размерами и характеристиками. Появление биений наблюдали и исследователи в [7] при нагружении гранитных образцов.

В дальнейшем на этапе, предшествующему глобальному разрушению, когда начинается нарушение целостности образца, резко возрастает амплитуда ЭМС, а спектр частот смещается в более низкую область в районе первых десятков килогерц. Однако небольшой пик наблюдается и в более высокочастотной области в диапазоне 450÷650 кГц. Это указывает на возникновение и более мелких трещин при развитии трещин отрыва. Зарегистрированные на различных этапах деформирования электромагнитные сигналы подвергались спектральному анализу, по результатам которого были построены амплитудно-частотные зависимости (рис.5). Предельная прочность образца скарна, амплитудно-частотные параметры ЭМС которого представлены на рисунке, составила 244 кН. Из рисунка видно, что этап формирования очага разрушения, по параметрам ЭМС, находится в интервале $0,56 \div 0,68 R_{\text{пред}}$ и характеризуется генерацией ЭМС в широком частотном диапазоне. На этом этапе спектры ЭМС имеют максимумы на частотах 100, 300 ÷ 500 кГц. На этапе, предшествующем разрушению, в интервале относительных сжимающих усилий $0,84 \div 0,89 R_{\text{пред}}$ увеличивается доля высокочастотных сигналов (450÷650) кГц, причем при приближении к предельной прочности $0,89 R_{\text{пред}}$ происходит смещение максимума амплитудно-частотной параметров сигналов (450÷650) кГц в область низких частот.

Таким образом, при проведении экспериментов на образцах горных пород Таштагольского железорудного месторождения, представленных сиенитами, скарнами и кварцсодержащим диабазом, установлено, что при их деформировании в процессе одноосного сжатия регистрируются электромагнитные сигналы, имеющие характерные амплитудно-частотные параметры на каждом этапе подготовки разрушения. Это обусловлено размерами и количеством образующихся дефектов. По изменениям амплитудно-частотных параметров

электромагнитных сигналов можно достоверно определять возникновение очага разрушения и его развитие в таких сложных гетерогенных системах, как горные породы. Проведенные исследования позволили выявить закономерности в изменениях амплитудно-частотных параметров электромагнитных сигналов при одноосном сжатии образцов горных пород. Анализ экспериментальных данных показал, что по изменениям тренда энергетических характеристик механоэлектрических преобразований возможно достоверно определять образование и развитие деструктивных зон, а также параметры разрушающих усилий образцов горных пород или других гетерогенных материалов. Характеристики электромагнитной эмиссии и амплитудно-частотные параметры электромагнитных сигналов горных пород, находящихся в натуральных условиях рудников, могут быть успешно использованы для мониторинга и краткосрочного прогноза развития деструктивных зон и геодинамических событий в породных массивах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров П.В. Эволюционная природа деструкции твердых тел//Физическая мезомеханика. 2007, т.10, № 3, с. 23-38.
2. Яворович Л.В., Беспалько А.А. Связь параметров электромагнитных сигналов с изменением напряженно-деформированного состояния горных пород//Деп. В ВИНТИ 04.10.06, № 1198-В2006, 194 З. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Федотов П.И., Виитман Е.В. Механоэлектрические преобразования в горных породах Таштагольского железорудного месторождения//Геодинамика. 2008, № 1(7), с. 54-60.
4. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Федотов П.И. Механоэлектрические преобразования в кварце и кварцсодержащих горных породах в процессе акустического возбуждения//ФТПРПИ, 2007, № 5, с. 22-27.
5. Панин В.Е., Гришаев Ю.В., Псахье С.Г. Физическая мезомеханика: достижения за два десятилетия развития, проблемы и перспективы // Физическая мезомеханика. 2004, т.7, спец.выпуск, ч.1, с. 25-40.
6. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Гольд Р.М., Дацко Д.И. Возбуждение электромагнитного излучения в слоистых горных породах при акустическом воздействии//ФТПРПИ, 2003, № 2, с. 8-14.
7. P. Koktavý, J. Pavelka and J. Sikula Characterization of acoustic and electromagnetic emission sources//Measurement science and technology, 2004, № 15, с. 973–977.

ТЕПЛОВИЗИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ СВАРИВАЕМОГО ИЗДЕЛИЯ ПРИ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Ильященко Д.П., Чинахов Д.А.

Юргинский технологический институт (филиал) Томского политехнического университета

652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская 26,

E-mail: mita8@rambler.ru

Большинство сварочных процессов предусматривает нагрев соединяемых деталей с помощью различных источников теплоты. В этом случае, качество сварного соединения во многом определяется условиями нагрева и охлаждения. Характер протекания тепловых процессов определяет производительность плавления основного металла и присадочного материала, направление и полноту протекания металлургических процессов в сварочной ванне, условия формирования структуры металла шва и зоны термического влияния, а также эксплуатационные свойства сварных соединений.

Управление термическим циклом в соединяемом материале является одной из основных задач сварочного производства при изготовлении ответственных конструкций.

Современные теории и работы [1-4] по изучению тепловых процессов при сварке, формулирующие основные понятия и законы распространения температурных полей, не учитывают ряд значимых факторов (теплообмен с окружающей средой, способ сварки и др.). Рекомендуются расчетные формулы, как правило, содержат сложные функции, что влечет за собой увеличение времени расчета, привлечение сложного математического аппарата и вычислительной техники. Тем не менее, полученные расчетным путем данные зачастую не совпадают с практическими значениями.

Наиболее точно и адекватно описать тепловые процессы можно по результатам экспериментальных исследований температурных полей. Традиционно на практике регистрацию температурных полей осуществляют: термокасками; термокарандашами; термопарами; пирометрами.

Однако все перечисленные методы оценки распределения тепловой энергии в изделии имеют свои недостатки, связанные с локальным и контактным (за исключением пирометров) характером измерений. Наиболее полную и точную картину температурных полей можно получить с использованием современной тепловизионной аппаратуры.

Для регистрации температурных полей в изделиях при сварке плавлением были проведены исследования по методике, описанной в работе [5]. Осуществляли наплавку валика ручной дуговой сваркой (РДС) покрытыми электродами марки LB 52U на пластину 100x150 мм толщиной

6 мм из стали 09Г2С. Использовали наиболее применяемый источник питания ВД-306 и инверторный источник питания нового поколения Nebula-315. Регистрацию температурных полей (рис. 1) осуществляли с помощью тепловизора ThermaCAM P65HS фирмы FLIR (США). Съемку проводили на протяжении времени сварки одного прохода с частотой смены термоизображения 5 Гц. Адекватность полученных температурных полей контролировали с помощью инфракрасного пирометра С-500.

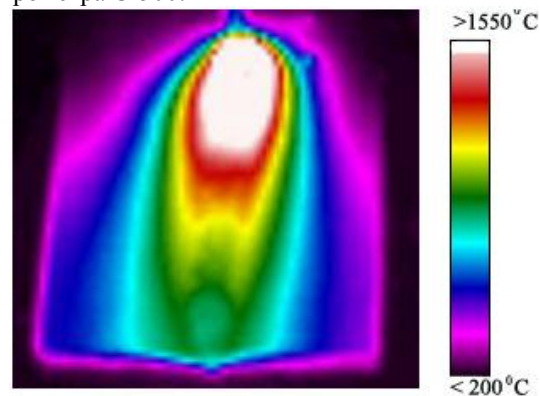


Рис. 1 Тепловизионная термограмма, иллюстрирующая распределение температуры в зоне сварного шва

После обработки исходных термограмм в приложениях ThermaCAM Researcher и математическом пакете MATLAB в виде набора m-файлов получили изображения изотерм на поверхности пластины (рисунок 2).

Анализ экспериментальных результатов по показал, что существенное влияние на распределение температуры по поверхности свариваемого изделия при РДС оказывает тип источника питания для сварки.

Путем анализа полученных термограмм (рисунок 2) установлено, что инвертор обеспечивает более вытянутые по длине и меньшие по ширине линии температурных полей по сравнению с диодным выпрямителем.

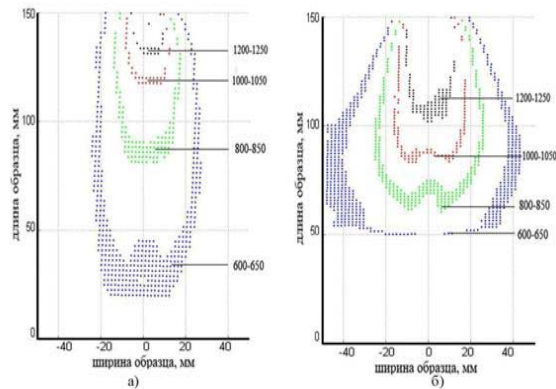


Рис. 2 Температурные поля после обработки (сварочный ток 100А, напряжение 25В, скорость сварки 13...14 см/мин): а – инвертор; б – диодный выпрямитель

В результате анализа осциллограмм тока и напряжения, полученных с помощью регистратора параметров сварки AWR524 от инвертора и диодного выпрямителя (рисунок 3), обнаружено различие энергетических параметров процесса сварки во время образования и переноса капли электродного металла. При сварке инверторным источником амплитуда тока изменяется в пределах 90...140 А, а при сварке диодным выпрямителем – в пределах 80...160 А при одном и том же значении среднего сварочного тока 100А. Следовательно, изменяется тепловое воздействие дуги на каплю электродного металла.

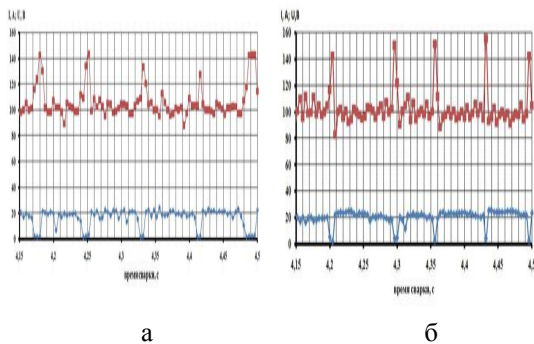


Рис. 3. Осциллограммы токов и напряжения (электроды марки LB 52U диаметром 3,2 мм): а – Nebula-315; б – ВД-306

По методике [6] с помощью компьютерной программы Mat Lab произвели аналитический расчет теплосодержания капли электродного металла в зависимости от энергетических характеристик процесса сварки. Алгоритм расчета представлен в таблице 1.

Таблица 1

Методика определения теплосодержания капли электродного металла при сварке от различных типов источника питания

Алгоритм расчета теплосодержания капли в программе Mat Lab	Теплосодержание капли при сварке от Nebula 315, $Q_k, 10^7 \text{Дж}$,	Теплосодержание капли при сварке от ВД 306, $Q_k, 10^7 \text{Дж}$,
$u1=[u_1; u_2; \dots];$ $i1=[i_1; i_2; \dots];$ $[U1,I1]=\text{meshgrid}(u1,i1)$ $t1=t_1; t_2; t_3; t_4; \dots;$ $Q_k=\text{sum}(\text{trapz}(0,2..0,3 * U1.*I1.*t1)),$ где $u_1, u_2, \dots, u_n; i_1, i_2, \dots, i_n$ – мгновенные значения напряжения, В; тока, А в единицу времени t_1, t_2, \dots, t_n .	1,1325	1,2503

Расчеты, выполненные аналитическим методом, показывают, что при сварке от инверторного источника питания энергия затрачиваемая на плавление электродного металла за 1 секунду в среднем составляет $Q_k = 1,1325 \times 10^7 \text{Дж}$, а при сварке от диодного выпрямителя $Q_k = 1,2503 \times 10^7 \text{Дж}$

Для проведения комплексного исследования влияния тепловложения в каплю расплавленного электродного металла на химический состав и микроструктуру сварного шва, а также механические свойства сварного соединения были заварены образцы из трубы $\text{Ø}159 \times 6$ (сталь 09Г2С) электродами марки LB 52U.

На полученных сварных образцах исследовали химический состав металла шва, микроструктуру и механические свойства сварных соединений.

Среднестатистический химический состав сварного шва [6], представлен в таблице 2.

Таблица 2
Химический состав сварного шва

Источник питания	Химический состав, %						
	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cu
ВД-306	0,10	0,52	1,03	0,01	0,014	0,05	0,03
Nebula-315	0,09	0,60	1,23			0,06	0,03

Исследование полученных микроструктур проводили методом оптической металлографии с использованием оптического микроскопа Olympus GX-71. При изготовлении шлифов использовалась механическая шлифовка, механическая полировка на алмазной пасте АСМ 10/7 НВЛ и химическое травление раствором 4 % азотной кислоты (HNO₃).

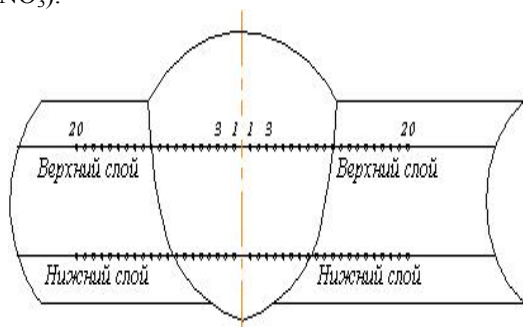


Рис. 4. Схема проведения микроструктурного анализа (шаг между точками 0,5 мм)

Анализ микроструктуры производили в два ряда по схеме, представленной на рисунке 4. Исходная структура стали 09Г2С в состоянии поставки представляет собой феррито – перлитную структуру. Перлита распределен равномерно (рис. 5 а,б), а количество и характер расположения перлита соответствуют баллу 1В по ГОСТ 5640-68.

Рассмотрим микроструктуру образца № 1 (инверторный источник питания)

Зона термического влияния – феррито-перлитная структура, измельчается размер феррита, феррит переходит в сорбитообразный. (рис. 5, в). Количество и характер расположения перлита соответствуют баллу 1Б по ГОСТ 5640-68.

Структура наплавленного металла шва – феррито – перлитная.

Образец №2 верхний ряд. В зоне сплавления металла шва и основного металла небольшая область с видманштеттовой структурой - балл 3Б по ГОСТ 5640-68. (рисунок 5, г). Структура шва аналогичная таковой в образце 1.

В нижнем ряду по сравнению с верхним рядом исчезает видманштеттова структура в шве, а также в области основного металла, прилегающего к шву, за счет эффекта автотермообработки.

Различия в полученные в микроструктуре сварного шва, можно объяснить меньшим теплосодержанием капли расплавленного электродного металла при сварке от инвертора (таблица 2) и более повышенным содержанием кремния и марганца, которые, как известно, являются элементами, снижающими рост видманштеттового феррита [8].

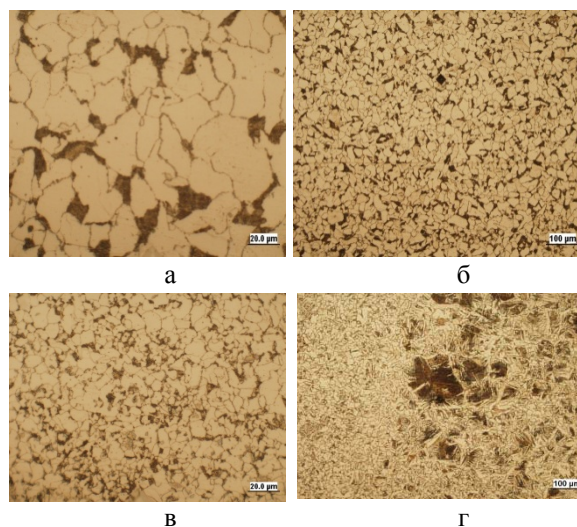


Рис. 5. Микроструктура сварного шва: а,б - микроструктура стали 09Г2С, г - микроструктура ЗТВ сварного соединения (Nebula 315); г - микроструктура ЗТВ сварного соединения (ВД-306)

Для исследования влияния типа источника питания на работоспособность сварных конструкций оценивали (по ГОСТ 6996 -70 [9]). Механические свойства сварных соединений, выполненных РДС от различных типов источника питания, представлены в таблице 3.

Таблица 3
Механические свойства сварных соединений выполненных из трубы Ø159×6 (сталь 09Г2С) электродами марки LB 52U

Источник питания	Предел прочности σ _в , МПа	Ударная вязкость КСЧ, Дж/см ² (надрез посреди шва)			
		+20 °С	0 °С	-20 °С	-40 °С
ВД-306	541-543 542	210	216	219	182
Nebula-315	550-560 550	217	235	237	193

Данные таблица 3 демонстрируют, показывает увеличение ударной вязкости, что можно объяснить отсутствием видманштеттовой структуры в ЗТВ и микроструктуре сварного шва полученного при использовании источника питания Nebula – 315.

Таким образом, тепловизионное исследование тепловых полей позволяет оценить зону термического влияния в режиме реального времени и спрогнозировать прочностные свойства, химический состав и механические свойства сварных соединений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов, В.В. Теория сварочных процессов [Текст]/В.В. Фролов// М.:Высш. шк. 1988. – 559 с.
2. Рыкалин, Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке [Текст]/Н.Н. Рыкалин// Москва 1951. – 291 с.
3. Березовский, Б.М. Математические модели дуговой сварки: в 7 т. Том. Основы тепловых процессов в свариваемых изделиях [Текст]/ Б.М. Березовский// Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 547 с.
4. Теория сварочных процессов: Учебник для вузов / под ред. В.М. Неровного. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2007. – 752с.: ил.
5. Чинахов Д.А., Давыдов А.А., Нестерук Д.А. «Методика обработки температурных полей при сварке плавлением» сборник трудов Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора А.А. Воробьева «Становление и развитие научных исследований в высшей школе»: – Том 2/ Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 462с.
6. Брунов О.Г. Механизированная сварка в среде активных газов с импульсной подачей сварочной проволоки: научное издание – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. - 137 с.
7. ГОСТ 22536. 1.....ГОСТ 22536.9 Сталь углеродистая и чугун нелегированный. Методы определения: углерода (1); серы (2); фосфора(3); кремния(4); марганца (5); хрома (7); меди (8); никеля (9).
8. Лившиц Л. С. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений. - 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1989. — 336 с.: ил.
9. ГОСТ 5264-80. Ручная дуговая сварка. Соединения сварные основные типы, конструктивные элементы и размеры.

СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОЛЩИНОМЕТРИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Ефимов В. Г., Ложкова Ю.Н.

Бийский технологический институт, 659305, Россия, г. Бийск, ул. Трофимова, 27
E-mail: julianna9@qip.ru

Теория вейвлет-преобразования (ВП) находит широкое применение в задачах неразрушающего контроля, в частности, в области ультразвуковой толщинометрии. Энергетические установки из полимерных композиционных материалов представляют собой специфический класс объектов контроля. Большие габариты, низкое отношение сигнал/шум, затрудняют применение традиционных методов выделения информативных признаков сигнала, направленных на определение временной координаты отраженного эхо-импульса.

Непрерывное ВП, в отличие от дискретного, менее требовательно к используемым базисным функциям и допускает их достаточно большую протяженность и не строгую ортонормированность. Это значительно расширяет возможный набор функций, позволяя достичь большей гибкости при анализе сигнала, приводит к более наглядным и часто аналитически представимым результатам, нежели при использовании дискретного базиса. Именно возможность использования достаточно произвольной функции позволяет подобрать ее такой, чтобы существенно повысить эффективность обработки данных, увеличить точность определения параметров обрабатываемого сигнала и добиться лучшей фильтрации.

Одним из практически значимых параметров преобразования является время спада, которое используется для определения зоны достоверности.

Результатом вейвлет-преобразования является двумерный массив коэффициентов в координатах «время-масштаб» или вейвлет-спектр обрабатываемого сигнала. Энергетический вейвлет-спектр, показывающий распределение энергии процесса как во времени так и по масштабам, более удобен для анализа чем вейвлет-спектр, представляющий собой в общем случае массив комплексных чисел. Зона достоверности определяет область, вне которой коэффициенты вычисляются по отрезкам, выходящим за границы временного ряда, при этом с ростом масштаба разложения все больше коэффициентов становятся недостоверными (рисунок 1).

В данном случае становится актуальным вопрос уточнения времени спада и выбора вейвлетного базиса для задач ультразвуковой (УЗ) толщинометрии.

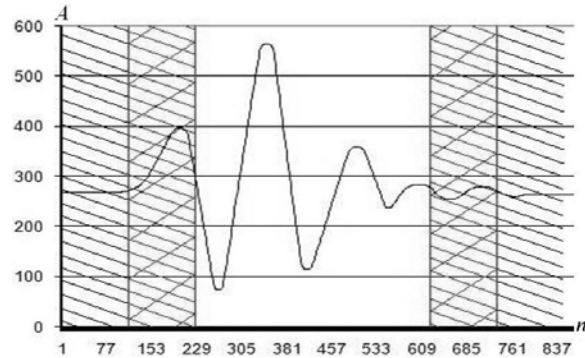


Рис.1. Зона достоверности восстановленного УЗ - сигнала на выбранном масштабе

При выполнении непрерывного вейвлет-преобразования необходимо, чтобы базис удовлетворял следующим условиям [1]:

Локализация. Вейвлет-преобразование, в отличие от преобразования Фурье, использует базисную функцию, которая должна быть локализована и во временном пространстве и по частоте.

Нулевое среднее:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi_0(t) dt = 0.$$

Нормированная энергия:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi_0^2(t) dt = 1.$$

Пусть в результате модельных или натурального эксперимента получен набор данных, описывающий форму отраженного эхо-сигнала. Цель заключается в получении из этих данных некоторой функции $\psi_0(t)$, которая, сохраняя сведения о форме сигнала, могла бы служить базисом вейвлет-преобразования.

Исходные данные представляют собой функцию дискретного времени $g(t_k)$. Поскольку искомая функция является функцией непрерывного времени, необходимо выполнить интерполяцию данных. В результате получим функцию $g(t)$, которая в общем случае не может являться базисом преобразования из-за указанных выше ограничений, накладываемых на функцию базиса. Удовлетворяются эти ограничения следующими последовательными преобразованиями:

- нулевое среднее обеспечивается путем вычитания из $g(t)$ его среднего значения:

$$\phi_1(t) = g(t) - \bar{g}(t);$$

- нормирование энергии:

$$\phi_2(t) = \frac{\phi_1(t)}{\|\phi_1(t)\|_2},$$

где $\|\phi_1(t)\|_2 = \sqrt{\int_0^T \phi_1(t) dt}$, T – время наблюдения;

- локализованность во времени:

$$\phi_3(t) = \phi_2(g\tau).$$

где τ – интервал времени убывания огибающей функции $g(t)$ в e раз (e -folding time [2]). Локализованность по частоте обеспечивается автоматически тем, что спектр УЗ-сигнала сосредоточен в узкой полосе около частоты заполнения импульса. Количественным показателем зоны является время спада (e -folding time). Этот показатель определяется как временной интервал, на краях которого энергия сигнала уменьшается в e^2 раз. Время спада определяется через функцию автокорреляции $\psi(\tau)$

между материнской функцией $\psi\left(\frac{t}{s}\right)$ и ее копией, сдвинутой на время спада $\psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right)$:

$$\psi(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi\left(\frac{t}{s}\right) \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt.$$

В Таблице 1 представлены опубликованные в работе [2] и рассчитанные значения времени спада для наиболее широко применяемых вейвлетов. Здесь s – масштаб разложения, Γ -гамма-функция, i – мнимая единица.

Таблица 1

Теоретические и расчетные параметры времени спада

Вейвлет	Материнская функция, $\psi\left(\frac{t}{s}\right)$	Время спада, τ [2]	Время спада, τ , (расчетное)
Morlet $\omega_0 = 5.336$	$\pi^{-\frac{1}{4}} e^{i\omega_0 \frac{t}{s}} e^{-\frac{t^2}{2s^2}}$	$s\sqrt{2}$	$2s\sqrt{2}$
МНАТ	$\frac{(1 - \frac{t^2}{s^2}) e^{-\frac{t^2}{2s^2}}}{\Gamma\sqrt{2.5}\sqrt{s}}$	$s\sqrt{2}$	$2s\sqrt{2}$

В результате расчетов функции установлено отличие времени спада от опубликованного [2] значения в 2 раза.

Проведенные исследования позволяют расширить диапазон масштабов вейвлет-разложения, следовательно, повысить точность восстановления и эффективность фильтрации исходных данных [3].

В качестве простого и хорошо характеризующего эффективность метода

определения временного положения сигнала критерия предлагается использовать величину, которая названа устойчивостью. Под устойчивостью метода будем понимать вероятность того, что погрешность определения временного положения сигнала не превысит некоторого значения:

$$k_E = P(|t - t^*| < E),$$

где t – временное положение сигнала, полученное с использованием какого-либо метода,

t^* – истинное значение временного положения сигнала,

E – временной интервал.

В дальнейшем временной интервал E везде принимается равным половине длины периода колебания исследуемого сигнала [4].

Поскольку при реальной обработке сигнала значение параметра t^* неизвестно, то данный критерий используется исключительно для целей оценки результатов численного моделирования применения того или иного метода. С использованием введенного критерия устойчивости k несложно установить насколько эффективен тот или иной базис для используемого нами метода.

Для оценки эффективности использования предложенного метода в совокупности с использованием оптимального базиса, далее проведено сравнение с существующими методами – по положению максимума амплитуды сигнала; корреляционным; вейвлет-преобразованием с использованием базиса Морле.

При расчете устойчивости для метода определения по максимуму сигнала аналогом значений спектра $W_\psi(a, b)$ вейвлет-преобразования являются

абсолютные значения исходного сигнала $|f(t)|$. Очевидно, что в этом случае среднеквадратичное отклонение (СКО) распределения равно СКО шума, присутствующего в сигнале $\sigma_a = \sigma$.

Для расчета устойчивости при использовании корреляционного метода вместо значений $W_\psi(a, b)$ использовались абсолютные значения корреляционной функции $M(\tau)$. Значение среднеквадратичного отклонения распределения каждого из дискретных отсчетов $|M(\tau)|$ будет равно:

$$\sigma_M = \sigma \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)| dt.$$

В качестве опорных функций использованы УЗ сигнал по ГОСТ 23702-90 и функция Берлаге

$$f(t) = t^a e^{-bt} \sin(ct).$$

Рисунок 2 иллюстрирует результаты моделирования при совпадении опорной функции и сигнала. В качестве опорного сигнала используется УЗ сигнал по ГОСТ 23702-90.

При отношении сигнал-шум больше 4 результаты применения вейвлет-преобразования с неоптимальным базисом имеют большую вероятность ошибки, чем простая процедура выделения максимума амплитуды сигнала. Этот вывод является неожиданным и несколько противоречит сложившемуся в публикациях мнению о заведомом преимуществе вейвлет-анализа по сравнению с другими методами. Впрочем, это говорит лишь о том, что необходимо разграничить области применения вейвлет-анализа и традиционных методов. Устойчивости корреляционного метода и вейвлет-анализа с использованием оптимального базиса примерно совпадают. Этот результат является ожидаемым, поскольку в обоих методах используется интегральная свертка и подставляемые в нее функции в обоих случаях совпадают. Значения $W_{\psi}(a, b)$ и $|M(\tau)|$ отличаются лишь на постоянный множитель.

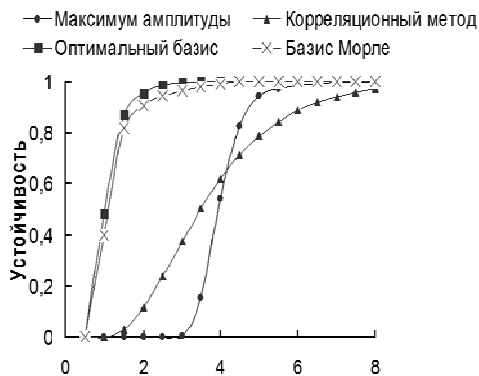


Рис.2. Зависимость устойчивости различных методов от отношения сигнал-шум

Для исследования чувствительности корреляционного метода и метода на основе вейвлет-преобразования к изменению принимаемого сигнала проведено моделирование, когда сигнал имеет отличную от опорной функции частоту и форму огибающей (Рисунок 3). Выделяемым сигналом является функция Берлаге с параметрами ($a = 2.7, b = 1, c = 3.5$), для функции опорного сигнала используются параметры ($a = 2.3, b = 1.2, c = 3$). График наглядно показывает преимущество предлагаемого метода по сравнению с корреляционным в случае отличия выделяемого и опорного сигналов при соотношениях сигнал-шум 1–3.

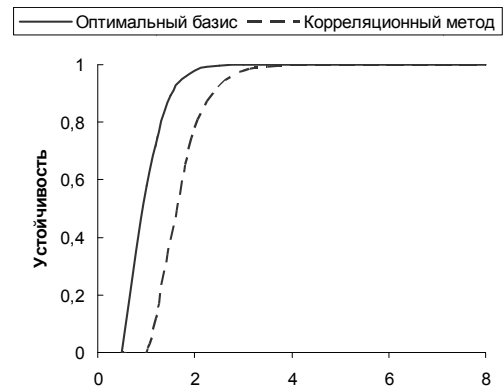


Рис.3. Сравнение методов при отличии опорного и выделяемого сигналов от отношения сигнал/шум

Таким образом, предложенный метод позволяет снизить погрешность определения временного положения эхо-импульса при низких соотношениях сигнал-шум (менее 3) и наличии искажений сигнала при прохождении через объект исследования по сравнению с ранее использовавшимися методами.

Кроме того, нужно обратить внимание на тот факт, что применение процедур вейвлет-анализа без адаптации их под данную конкретную задачу не приводит к значимому снижению погрешности определения времени, за которое УЗ сигнал проходит через объект.

В области неразрушающего контроля с использованием проникающих излучений целью вейвлет-анализа является извлечение более детальной информации о характере и особенностях происходящих процессов. К сожалению, приходится констатировать, что основная масса исследований ограничена использованием стандартных процедур вейвлет-анализа, например, в составе пакета компьютерной математики MATLAB. Истинная ценность вейвлет-анализа заключается в возможности для исследователя создавать вейвлетные базисы, наиболее приспособленные к решению собственных задач. Пример и эффективность такого использования для ультразвукового метода представлены в данной работе.

По сравнению с алгоритмами обработки с жестко фиксированной логикой (например, корреляционным методом) вейвлет-анализ, как «математический микроскоп» позволяет сфокусировать свое внимание на выделении нужного информативного параметра регистрируемого сигнала. В нашем случае временная локализация максимума вейвлетного спектра более устойчива к влиянию шумов, чем принятая в [5] процедура выделения по точке перехода сигнала через ноль между главным максимумом и минимумом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астафьева, Н.М. Вейвлет-анализ: спектральный анализ локальных возмущений (основы теории и примеры применения) / Н.М. Астафьева // Прикладная нелинейная динамика. 1996. – № 2. – С. 2–40.
2. Torrence C., Compo G.P. A Practical Guide to Wavelet Analysis // Bulletin of the American Meteorological Society, 1998. – V. 79, № 1. – P. 61–78.
3. Efimov V.G. Wavelet Analysis – New Opportunities for NDT. Nondestructive Testing and Evaluation, 2006. – V.21, № 1. – P. 27–38.
4. A method of quality comparison of different reference function application for ultrasonic measurement problems. Valery Efimov; Julia Lozhkova Nondestructive Testing and Evaluation, 1477-2671, First published on 01 April 2011
5. Хасегава К., Хори К. Новый метод измерения скорости горения твердого топлива с помощью ультразвука // Физика горения и взрыва, 2010. – Т. 46, № 2. – С.79–87.

РАЗРАБОТКА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТНОСТИ И ПРОЧНОСТИ БЕТОНА ПО ПАРАМЕТРАМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОТКЛИКА НА УПРУГОЕ УДАРНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ

Фурса Т.В., Осипов К.Ю., Данн Д.Д.

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: fursa@tpu.ru

Бетоны часто используются в конструкциях, где к ним предъявляются высокие требования по надежности, поэтому задача контроля их механических характеристик имеет важное практическое значение. Для решения этой задачи может быть использовано явление механоэлектрических преобразований при импульсном механическом возбуждении диэлектрических материалов [1-3]. На основе этих исследований разработан и запатентован способ неразрушающего контроля прочности гетерогенных материалов, алгоритм которого основан на использовании амплитудно-частотных характеристик электрического сигнала, возникающего при их ударном возбуждении [4]. Точность определения прочности в целом превышает известные механические методы, однако в отдельных случаях наблюдается значительная погрешность. Скорее всего, это связано с двумя основными причинами, приводящими к изменению амплитуды и частоты электрического сигнала, а именно, с наличием в материале незаряженных дефектов (трещин, внутренних и внешних воздушных полостей) и пьезоэлектрических включений.

Исследования были выполнены с помощью лабораторного комплекса, позволяющего производить импульсное механическое возбуждение материалов и регистрацию электрического сигнала. Импульсное механическое возбуждение образцов осуществлялось с помощью электромеханического ударного устройства, с нормированной силой удара. Для регистрации электрической составляющей переменного электромагнитного поля, возникающего при импульсном механическом возбуждении образцов, использовался дифференциальный электрический датчик. Сигналы с электрических приемников поступают на вход дифференциального усилителя и регистрируются с помощью многофункциональной платы ввода-вывода «NI PCI-6251», совмещенной с ЭВМ, позволяющей осуществлять оцифровку временной реализации электрического сигнала и быстрое Фурье-преобразование.

Исследования проводились на образцах тяжелого бетона 50x50x100 мм. Для создания различной степени трещиноватости партия образцов тяжелого бетона, которая состояла из 12 штук, была разбита на 6 групп по 2 образца в каждой и проведено различное количество циклов замораживания-оттаивания (4, 8, 12, 16 и 20

циклов). Кроме того имелась контрольная партия (2 образца), которая не подвергалась знакопеременным испытаниям. Перед проведением испытаний образцы насыщались водой, чтобы в процессе замораживания более эффективно происходил процесс возникновения и развития трещин. Замораживание производилось в условиях климатической камеры при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, а оттаивание в универсальной камере при температуре $(20\pm 5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ и влажности 95 %. В этой же камере во влажном состоянии находилась и контрольная партия. Длительность циклов замораживания и оттаивания составляла не менее 2-х часов. При таком режиме замораживания-оттаивания уже после 8-10 циклов на поверхности образцов появлялись отдельные видимые трещины. Так как приповерхностные слои исходно имеют значительно менее прочную структуру, то и развитие трещин в первую очередь начинается с приповерхностных слоев.

После окончания знакопеременных испытаний все образцы были высушены до нормальной влажности и проведено измерение из них электрических откликов на упругое ударное возбуждение. Затем образцы были разрушены на прессе и определена их реальная прочность на сжатие.

На рисунке 1 приведены амплитудно-частотные характеристики электрических сигналов из бездефектного (контрольного) образца тяжелого бетона (а), и из такого же образца, прошедшего 20 циклов замораживания-оттаивания (б).

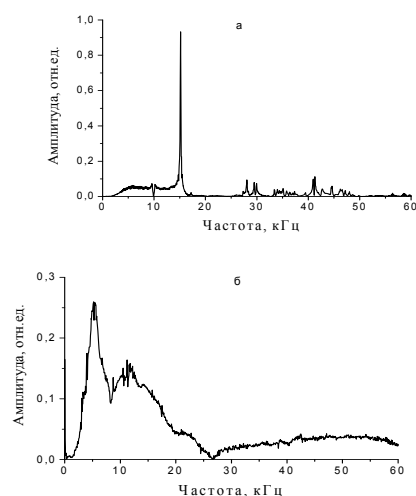


Рис.1. Амплитудно-частотные характеристики электрических откликов из контрольного (а) и дефектного (б) образцов тяжелого бетона

Как видно из рисунка наличие в образце трещин приводит к значительному изменению амплитудно-частотной характеристики электрического сигнала по сравнению с амплитудно-частотной характеристикой сигнала, который регистрируется из образца без трещин. Кроме того повышение дефектности приводит к снижению прочности, в частности, прочность контрольного образца составила 26,5 МПа, а дефектного 13 МПа.

Проведенными ранее исследованиями установлено, что электрический отклик при механоэлектрических преобразованиях является следствием возбуждения акустической волной источников сигнала (двойных электрических слоев на границе компонентов и неоднородностей в гетерогенном материале и пьезоэлектрических включений), при котором возникает переменное электромагнитное поле, преобразуемое в электрический сигнал емкостным датчиком [3]. Поэтому амплитудно-частотные характеристики электрического отклика в значительной степени определяются волновым полем, формирующимся в образце при его импульсном механическом возбуждении. Изменение волновой картины в процессе трещинообразования связано с процессами рассеяния акустических волн на развивающихся трещинах [5].

Для количественной оценки изменения формы амплитудно-частотных характеристик электрических сигналов был использован корреляционный анализ. С помощью программы в среде программирования LabView осуществлялось последовательное смещение амплитудно-частотной характеристики сигнала из дефектного образца относительно амплитудно-частотной характеристики электромагнитного сигнала из бездефектного (контрольного) образца, рассчитывался выборочный коэффициент корреляции по формуле:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

где: X_i и Y_i - две сравниваемые последовательности; \bar{X} и \bar{Y} - их средние значения; n - объем выборки (количество точек по оси частоты амплитудно-частотной характеристики сигнала);

И определялся максимальный коэффициент взаимной корреляции двух сравниваемых амплитудно-частотных характеристик электрических сигналов и величина смещения (по частоте), при котором наблюдается максимальный коэффициент корреляции.

Рассмотрим, как зависит максимальный коэффициент взаимной корреляции, от прочности образцов тяжелого бетона, прошедших различное количество циклов замораживания-оттаивания (рисунок 2).

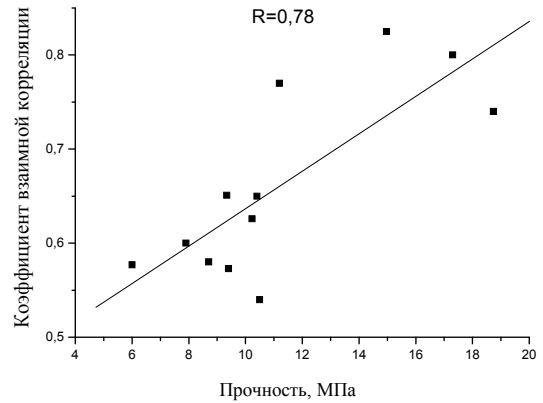


Рис. 2. Зависимость максимального коэффициента взаимной корреляции спектров сигнала из тяжелого бетона со спектром сигнала из контрольного образца

Как видно из рисунка, уменьшение прочности, вызванное циклическим замораживанием-оттаиванием, приводит к уменьшению максимального коэффициента взаимной корреляции. Аппроксимация линейной зависимостью дает коэффициент корреляции порядка 0,78. То есть зависимость коэффициента взаимной корреляции с прочностью существует, но разброс значений достаточно высок.

Изменение величины смещения, при котором наблюдается максимальный коэффициент взаимной корреляции спектра сигнала из образцов, прошедших различное количество циклов замораживания-оттаивания, со спектром сигнала из контрольного образца, является результатом изменения скорости звука в образцах (рисунок 3).

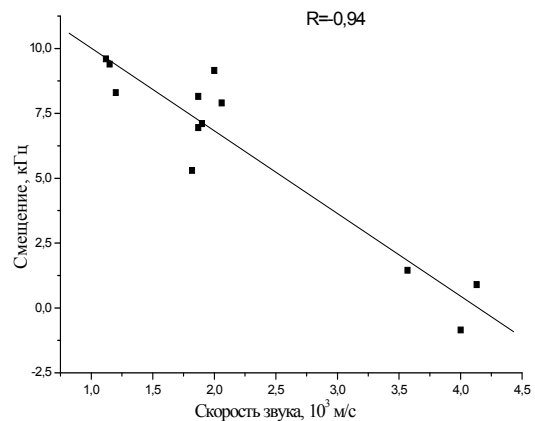


Рис. 3. Зависимость смещения, при котором наблюдается максимальный коэффициент взаимной корреляции, от скорости звука образцов тяжелого бетона

Данная зависимость с очень высоким коэффициентом (0,94) описывается линейной зависимостью.

Наблюдаемая высокая корреляция смещения, при котором наблюдается максимальный коэффициент взаимной корреляции спектра электрического сигнала из исследуемого образца со спектром контрольного образца, со скоростью звука говорит о том, что смещение может служить одним из критериев оценки прочности с использованием явления механоэлектрических преобразований.

На рисунке 4 приведена зависимость смещения от прочности для этой же партии образцов тяжелого бетона.

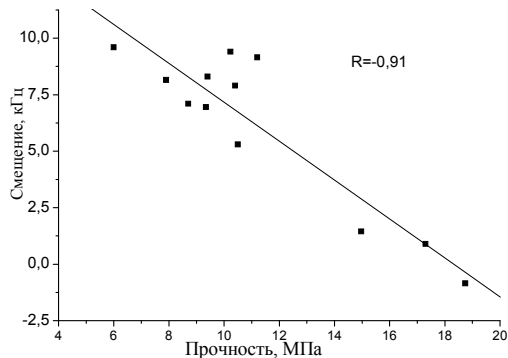


Рис. 4. Зависимость смещения, при котором наблюдается максимальный коэффициент взаимной корреляции, от прочности тяжелого бетона

С одной стороны снижение коэффициента взаимной корреляции с уменьшением прочности свидетельствует о наличии в материале дефектов в виде трещин, которые и приводят к снижению прочности. С другой стороны увеличение смещения свидетельствует об уменьшении скорости звука с уменьшением прочности.

Для учета этих двух факторов используем в качестве алгоритма определения прочности частное от деления смещения на коэффициент взаимной корреляции - обобщенный параметр (рисунок 5).

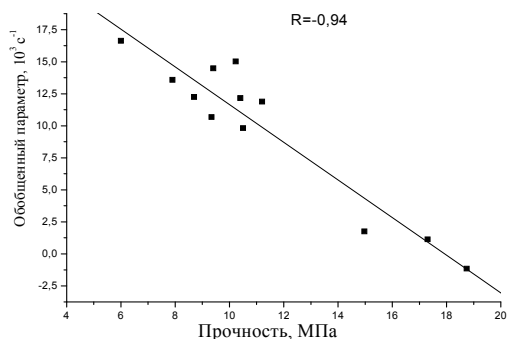


Рис. 5. Зависимость обобщенного параметра от прочности тяжелого бетона

Как видно из рисунка, предложенный обобщенный параметр имеет более высокую корреляцию ($R = 0,94$) с прочностью по сравнению с максимальным коэффициентом корреляции и смещением, при котором он наблюдается.

При проведении испытаний образец размером 50x50x100 мм устанавливался малой плоскостью на точечные опоры, а ударное устройство закреплялось в измерительной ячейке с помощью специальных зажимов на расстоянии 3 мм от верхней поверхности образца. В такой геометрии эксперимента образец находится практически в свободном состоянии и представляет собой систему, близкую к стержню, в котором формируются преимущественно продольные акустические колебания вдоль длины стержня, а затухание определяется упругими характеристиками материала образца. Поэтому для упрощения процедуры осуществления неразрушающего контроля по предложенному методу в качестве математического эталона электромагнитного сигнала из бездефектного образца используются свободно затухающие гармонические колебания. Для чего с помощью программы в среде программирования LabView моделируется форма сигнала свободно затухающих гармонических колебаний, которые происходят по закону:

$$Y(t) = A e^{-\beta \cdot t} (\sin 2\pi f t)$$

где: A – амплитуда колебаний, β – коэффициент затухания, f – частота колебаний, n – объем выборки (количество точек по оси частоты амплитудно-частотной характеристики сигнала).

На рисунке 6 приведены спектры электромагнитного сигнала из бездефектного образца бетона и математического эталона.

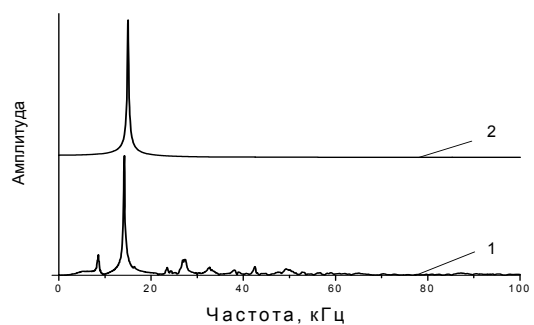


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики: 1 – электромагнитного сигнала из бездефектного образца, 2 – свободно затухающих гармонических колебаний (математического эталона)

Частота задаваемых колебаний в эталоне может отличаться от частоты основного максимума амплитудно-частотной характеристики электрического сигнала из бездефектного образца

на единицы и даже десятки кГц, так как для нахождения максимального коэффициента корреляции в процедуре со смещением это не имеет значения.

Поэтому один и тот же эталон может быть использован для контроля прочности изделий любого геометрического размера, однако для изделий разного размера необходимо получать и использовать свою градуировочную зависимость, так как в зависимости от геометрии изделия изменяется частота основного спектрального максимума, что приводит к изменению величины смещения при осуществлении процедуры расчета коэффициента корреляции со смещением.

На рисунке 7 приведена зависимость обобщенного параметра, полученного на основе сравнения электрических сигналов из исследуемых образцов с математическим эталоном, от прочности образцов тяжелого бетона.

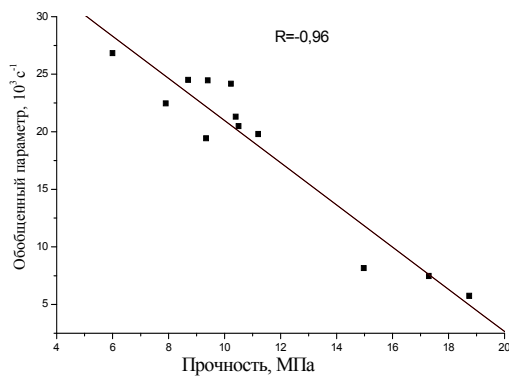


Рис. 7. Зависимость обобщенного параметра, полученного с использованием математического эталона, от прочности тяжелого бетона

Как видно из сравнения рисунков 5 и 7 использование математического эталона дает более высокий коэффициент корреляции с прочностью и исключает влияние исходной структурной неоднородности, которая возникает в процессе изготовления бетона.

Средняя погрешность определения прочности по предложенному методу для тяжелого бетона составляет 9 %.

Перед разрушением было проведено измерение прочности образцов с помощью стандартного электронного измерителя прочности строительных материалов ИПС – МГ4+ (склерометра). При определении прочности использовалась градуировочная зависимость для тяжелого бетона на гравии, заложенная в приборе. Для примера на рисунке 8 приведена зависимость прогнозируемой с помощью склерометра и реальной прочностью.

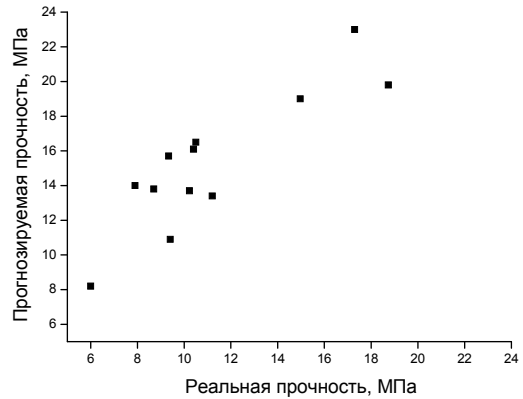


Рис. 8. Зависимость прогнозируемой с помощью склерометра прочности от реальной прочности образцов тяжелого бетона

Как видно, во-первых, склерометр дает завышенные в целом значения, а во-вторых, погрешность в определении прочности очень высокая, иногда превосходит 50%.

Проведенные исследования показывают, что предложенный обобщенный амплитудно-независимый параметр для неразрушающего контроля прочности с использованием явления механоэлектрических преобразований дает значительно более высокую точность прогноза прочности по сравнению со стандартным механическим методом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фурса Т.В., Суржиков А.П., Осипов К.Ю. Разработка акустоэлектрического метода определения пористости диэлектрических материалов // Дефектоскопия. - 2007. - № 2 - С. 27-34.
2. Фурса Т.В., Суржиков А.П., Хорсов Н.Н., Осипов К.Ю. Исследование взаимосвязи степени напряженно-деформированного состояния композиционных материалов с параметрами электромагнитного отклика на импульсное механическое возбуждение // ЖТФ. - 2006. - Т.76, Вып.4 - С. 129-132.
3. Суржиков А.П., Фурса Т.В. Механоэлектрические преобразования при упругом ударном возбуждении композиционных диэлектрических материалов // ЖТФ. - 2008. - Т.78, Вып.4 - С.71-76.
4. Суржиков А.П., Фурса Т.В. Способ контроля прочности изделий из твердых материалов // Пат. 2190204 Российская Федерация, МПК7 G 01 N 3/30.
5. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. - М., 1981. - 280 с.

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ АЭРОКОСМИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ

Сырымкин В.И., Горбачев С.В., Гафуров А.О., Глушков Г.С., Бородин В.А.

МУНПЦ «Технологический менеджмент» г. Томск

E-mail: GGS_1982@mail.ru

Комплексная интерпретация геофизических, геохимических данных

Физические поля, наблюдаемые над месторождениями нефти и газа, видоизменяются в зависимости от расположения залежей и интенсивности процессов преобразования надпродуктивной толщи пород под воздействием миграции углеводородов. Они позволяют создать многомерное признаковое пространство, которое можно использовать как фактическую основу для прогнозирования контура нефтегазоносности в рамках задачи комплексной интерпретации – построении новых объектов на карте, однородных в смысле некоторого критерия или группы критериев. В этом смысле задача сводится к неформализованной проблеме классификации, причем в соответствии с актами и каротажными оцифрованными диаграммами испытаний разведочных скважин в простейшем случае могут использоваться два класса (I – "продуктивные скважины", II – "пустые"), а в более сложных задачах число классов может быть увеличено по любому признаку, например "водно-нефтяной контакт".

На вход подаются рассчитанные модулем «КАРТА» цифровые карты-сетки различных геофизических и геохимических параметров, при этом учитываются дизъюнктивные нарушения, и для каждого класса формируется эталон, считая, что все точки, попавшие в данное пространство около скважины, несут определенную информационную нагрузку. На основе эталонов нейронная сеть обучается классифицировать принадлежность каждой точки карты конкретному классу (рис.1). Для обучения на основе полученных эталонов используются двухслойные нейронные сети с сигмоидной функцией активации нейронов:

$f(A) = A / (c + |A|)$, где A - выход сумматора нейрона, а константа c - параметр крутизны сигмоиды.

Логически прозрачный нейрончик для поиска нефти, газа

В рамках классической нейросетевой парадигмы топология нейросетей задается исходя из эвристических соображений и часто имеет избыточную структуру - избыточность свободных параметров нейронной сети (веса, нейроны) приводит к ухудшению результатов настройки сети, известному как *overfitting* – когда свободные параметры начинают подстраиваться под шум, отклоняя процесс обучения НС от оптимального. Также при обучении иногда приходится сталкиваться со "сваливанием" функции в

локальный минимум, а веса межнейронных связей и нелинейность функции активации нейронов не поддаются анализу и интерпретации человеком.

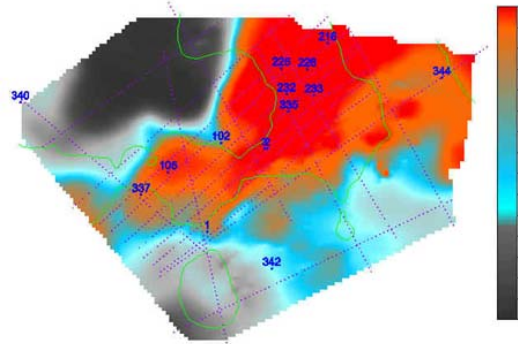


Рис.1. Прогнозная карта нефтеносности на Южно-Черемшанском месторождении по результатам нейросетевого обучения

Реализована возможность расширения интеллектуальных свойств обучаемых сетей за счет перехода от формальной нейросетевой модели "черного ящика" к простейшим логическим элементам (пороговым и булевым), реализуемым в двухвходовых самоорганизующихся логических сетях, структура которых минимальна. Это позволило перейти к недорогой элементной базе вычислительных устройств, реализуемых на основе технологии ПЛИС. Данная технология в последнее время находит все более широкое практическое применение при реализации нейровычислителей, работающих в режиме реального времени.

Обучающая выборка была составлена из 12-ти примеров (разведочных скважин), семь из которых были нефтяными, а пять – вода с признаками нефти, кодированные 1 и 0, соответственно. На вход сети подаются векторы геофизических и геохимических параметров, соответствующие на карте точкам разведочных скважин. В частности, на Южно-Черемшанской площади использовалось 10 параметров.

После обучения синтезированная сеть безошибочно классифицировала все предъявленные ей примеры. Она состоит из трех слоев: в первом из них содержится 30 нейронов, во втором – 62, в третьем – 42. На принятие сетью решения влияют девять переменных $x_1, x_2, x_3, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}$ из десяти. Эти входы образуют соответственно 7, 7, 7, 17, 7, 20, 33, 30 и 8 соединений в сети, представляя таким образом информативный вклад (значимость) каждого из параметров в принятие решения (рис.2).

Синтезированная логическая сеть, обученная на данных Южно-Черемшанского нефтяного месторождения, задает схему устройства, которое может быть использовано для создания интеллектуальных геологоразведочных приборов измерения и интерпретации полевых данных на местности в комплексе со штатной геофизической аппаратурой, например, через порт RS-232. Такие приборы в настоящее время пользуются большой популярностью у геологов.

При переходе от одного месторождения к другому данное устройство можно перепрограммировать на основе новых разведочных данных.

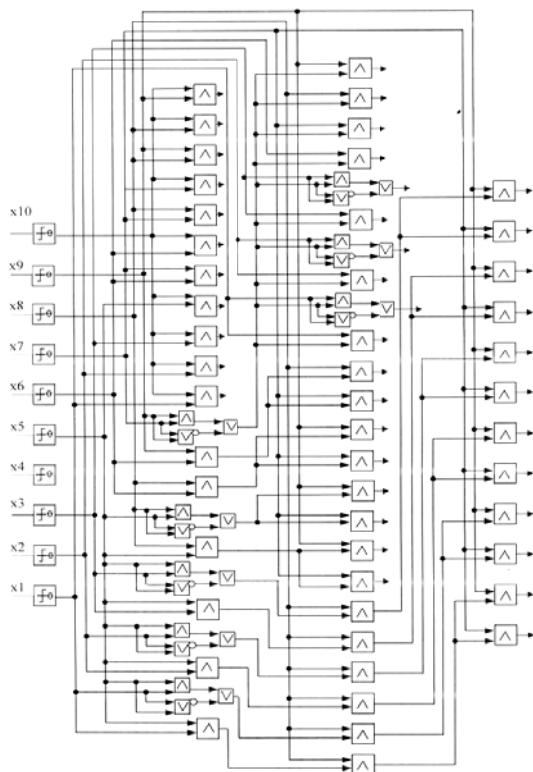


Рис.2. Логическая сеть, синтезированная по результатам обучения на Южно-Черемшанском месторождении

Поскольку обученная сеть булева, искомые решения могут быть предварительно вычислены и представлены таблицей истинности для всех $L=2^9$ комбинаций значений булевых переменных z_i , $i=1, \dots, 9$, полученных пороговым квантованием исходных непрерывных переменных x_i . Для каждой j -й строки этой таблицы вычисляется коэффициент согласованности решения M_j , $j=1, \dots, L$. Таким образом, можно составить решающие (диагностические) правила в виде системы из L логических выражений, имеющих форму продукции "Если..., то", позволяющие диагностировать классы (нефть - 1, вода - 0). Каждое из этих логических выражений характеризуется коэффициентом согласованности решения M_j . Очевидно, $M_j=1$ для тех наборов

значений переменных, которые образуют обучающую выборку.

Нейрокомпьютерная система распознавания нефтегазоперспективных зон по сейсмическим разрезам

Система предназначена для выявления и оконтуривания нефтегазоперспективных объектов по сейсмическим разрезам и обеспечивает решение нефтегазопроисковых и разведочных задач в условиях минимального объема скважинной информации.

Первичные сейсмические наблюдения в виде временных разрезов обрабатываются с целью формирования обучающей выборки - участков сейсмических трасс, приуроченных по анализу скважинных данных и сейсмомоделирования к залежам нефти и местам ее отсутствия. После обучения нейрокомпьютерная сеть анализирует в указанном временном интервале сейсмические разрезы с выдачей числовых значений вероятности наличия нефти в каждой точке профиля. По полученным в результате анализа данным строится цифровая прогнозная карта нефтеносности отложений [1-7].

Система обеспечивает повышение эффективности геологоразведочного процесса за счет:

- сужения области поиска и, как следствие, сокращения расходов на бурение глубоких скважин;
- полноты использования информации, содержащейся в сейсмических волновых полях, и обеспечение высокой точности и надежности прогнозных решений;
- широкого использования скважинной информации при обучении сети и анализе сейсмических разрезов.

Преимущества использования алгоритмов, базирующихся на работе *нейронных сетей* перед стандартными алгоритмами обработки кадра изображения включают в себя большую устойчивость к изменению признакового пространства в пределах снимка (изменению обрабатываемой площади, масштабированию), меньшую требовательность к стандартизации изображения (углу солнца, атмосферному искажению), легкую воспроизводимость, дообучаемость в случае изменения или усложнения задач, простоту при дальнейшем использовании в качестве стандартов выделения тех или иных объектов, возможность обработки многозональных изображений и геометрически совмещенных "пачек" разновременных многозональных изображений.

Более детальное изучение возможностей различных типов нейронных сетей показало, что оптимальными для тематической обработки являются нейронные сети Кохоненна. Особенности их работы позволяют корректировать обработку на любом этапе,

включая процесс первичной интерпретации свойств обрабатываемого изображения. К тому же они не требуют обязательного для большинства типов нейронных сетей этапа первоначального экспертного обучения, а, наоборот, способны подсказать разумное количество классов, достаточных для описания конкретной тематики. Процедура их коррекции получила название "тематической ориентации" нейронной сети. Наиболее обнадеживающие по скорости работы и точности распознавания тестовых объектов результаты получены при параллельной обработке нескольких разновременных, геометрически совмещенных многозональных изображений тестовых территорий.

Для повышения надежности классификации отдельных пикселей с учетом пикселей в локальной окрестности целесообразно использование методов нечеткой логики. Кроме того, применение методов обработки изображений на основе "wavelet-анализа", позволяет осуществлять обработку изображений, повышающую качество тематической дешифровки многозональных изображений.

Таким образом, комплексная обработка и нейросетевой анализ космической, геологической, геоморфологической, геофизической и геохимической информации проводятся с целью определения морфологии, глубины залегания и генезиса прогнозируемых объектов, т.е. их завершающей классификации. Этап комплексной обработки позволяет получить совокупность физических, математических, геологических и статистических характеристик выявленных структур, т.е. практически составить пространственный физико-геологический "портрет" исследуемых объектов в абсолютных значениях параметра.

Кроме геологического картографирования данные технологии могут применяться в оценке лесов, мониторинге земель, прогнозировании и мониторинге чрезвычайных и аварийных ситуаций, экологическом мониторинге, оценке метеообстановки, ледовой разведки и т.д [1-7].

Нейрокомпьютерный анализ данных космической, аэрофотосъемки

Система предназначена для предварительной оценки нефтегазоперспективности объектов по данным дистанционного зондирования, при этом решаются 3 взаимосвязанных задачи: структурно-тектонического картирование ловушек углеводородов, оценка продуктивности ловушек углеводородов и прогнозирование зон деструкции в ловушках углеводородов.

Проведенные исследования позволили выявить несколько важных закономерностей.

1) Среднее значение спектральной яркости нефтегазоносных структур выше, чем среднее значение пустых структур. Эта тенденция в равной степени проявляется для всех каналов и

разных периодов времени, что позволяет использовать для анализа нейросетевые карты Кохонена.

2) Для нефтегазоносных структур обнаруживается устойчивая почти линейная связь между данными, полученными в период май-сентябрь во всех спектральных диапазонах. При этом для пустых структур такая связь проявляется менее очевидно и присутствует, в основном, между данными, полученными в июне и сентябре - значения яркостей формируются под влиянием большого числа экзогенных факторов, механизм воздействия которых абсолютно случаен и подвержен сезонным колебаниям.

Данный признак можно использовать как дополнительный поисковый признак, особенно в ситуациях, когда отсутствуют данные по эталонным структурам, которые можно было бы привлечь для процесса обучения прогноза нефтегазоносности.

3) Существует объективная связь между продуктивными скважинами и узлами пересечения разрывных нарушений, прогнозируемых по космическим данным и не зафиксированных сейсморазведкой. Частота присутствия этих нарушений для продуктивных скважин статистически достоверно превышает частоту их наличия для непродуктивных скважин.

При проведении статистического анализа использовались следующие морфологические характеристики локальных поднятий: мощность осадочного чехла; площади структуры по фундаменту, девону, бобриковскому горизонту, башкирскому ярусу, амплитуда по этим опорным поверхностям, площадь структуры по космическим данным и амплитуда поднятий в рельефе. По результатам анализа наиболее информативной характеристикой разграничения продуктивных и непродуктивных структур является значение площади локальной структуры по башкирскому ярусу. Вероятность правильного распознавания по этой характеристике составила 84,6%.

На этапе *предварительной обработки* система рассчитывает по данным ДЗЗ и геолого-геофизической информации параметрические поля в абсолютных физических величинах (поля яркости, альbedo, радиационные температуры, освещенности, вегетации, инсоляции и т.д.) [1-7].

Тематический анализ осуществляется по двум направлениям: визуальное дешифрирование или распознавание геологических объектов (включая соответствующие им признаки) сквозь почвенно-растительный покров с целью их предварительной классификации (типизации) и создание многослойной модели данных (ММД), включающей совокупность параметрических и геолого-геофизических полей. Автоматизированный расчет характеристик этих объектов по ММД позволяет получить и

систематизировать большой объем принципиально новой информации по каждому выявленному геологическому объекту, повышающей, в конечном счете, достоверность прогноза. Применяемые методы спектрального и корреляционного анализа и классификации, температурной коррекции и параметрической кластеризации физических полей дают возможность с высокой степенью достоверности выявлять спектральные и тепловые аномальные зоны, характеризующие наличие признаков углеводородов в приповерхностном слое Земли

ЛИТЕРАТУРА

1. Уоссермен Ф., Нейрокомпьютерная техника, М., Мир, 1992 г.
2. Методы нейроинформатики / Под. ред. А.Н. Горбаня; отв. за выпуск М.Г. Доррер. КГТУ, Красноярск, 1998 г.
3. Дертоузис М., Пороговая логика. - М.: Наука, 1967
4. Knowledge Discovery Through Data Mining: What Is Knowledge Discovery? — Tandem Computers Inc., 1996.
5. Christopher M. Bishop, Neural Network for Pattern Recognition. Oxford University Press, Oxford, 1997, 482 с.
6. Ivaxnenko, G. A. (1995). Self-organization of neuronet with active neurons for effects of nuclear test explosions forecastings. System Analysis modeling Simulation (SAMS), 20, pp. 107-116.
7. Schetinin V.G., Kostunin A.V. Self-Organization of Neuron Collective of Optimal Complexity// In Proc. Internat. Symp. "Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA' 96)".- Japan, 1996, pp. 245-248.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОБРАБОТКИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Степанова Л.Н., Рамазанов И.С.

ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина», 630051, г. Новосибирск, ул. Ползунова, 21.

E-mail: aergroup@ngs.ru

В процессе обработки акустико-эмиссионной (АЭ) информации необходимо получить максимально возможное количество сведений обо всех обнаруженных источниках сигналов АЭ. Для решения этих задач в режиме реального времени можно применять различные методы кластерного анализа.

Параметры сигналов АЭ рассчитываются по цифровой форме, содержащей всю доступную для наблюдения информацию. Наиболее надежным считается метод кластеризации, использующий в качестве меры сходства максимум коэффициента корреляции [1-2]. Основным недостатком этого метода является большой объем необходимых вычислений. Коэффициент корреляции определяется a раз для каждой пары сигналов АЭ, где a – относительное смещение форм сигналов из-за неточного определения времени прихода. Сложность метода кластеризации возрастает с пропорционально N^2 , где N – число обрабатываемых сигналов АЭ. Для использования в реальном времени необходима разработка упрощенных алгоритмов кластеризации, основанных на применении вычислительно менее сложной меры сходства анализируемых наблюдений.

Решением является сравнение сигналов АЭ по предварительно рассчитываемым по их цифровой форме параметрам. При этом, какой бы вычислительно емкой ни была процедура расчета отдельных параметров, это не сказывается на времени обработки, так как сложность метода будет возрастать пропорционально $N \cdot n_p$, где n_p – число используемых параметров сигнала АЭ.

В переднем фронте сигнала АЭ содержится основная информация об его источнике излучения. Поэтому необходимо использовать при кластеризации параметры, рассчитываемые по переднему фронту. Для сравнения надежности методов кластеризации был проведен вычислительный эксперимент. Исходные данные представляли собой сигналы АЭ от двух положений датчика имитатора на стальном листе.

Для кластеризации были использованы три различных метода. Первый метод кластеризации по переднему фронту сигнала АЭ был вычислительно наиболее простым. В качестве параметров сигналов АЭ использовалась скорость нарастания переднего фронта сигнала АЭ, оцениваемая на двух временных интервалах по времени превышения амплитудой сигнала двух пороговых уровней. Преимуществами метода является возможность относительно простой схемотехнической реализации устройства для

кластеризации сигналов непосредственно в процессе регистрации, а также независимость времени обработки данных от количества присутствующих источников сигналов АЭ.

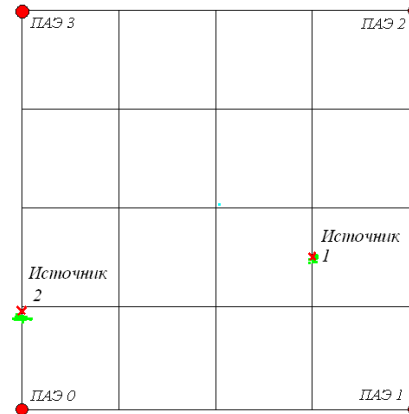


Рис. 1. Положение источников и локализация сигналов АЭ на стальном листе от датчика имитатора

Второй метод использовал вычисленные координаты источника и погрешность их расчета, доминантную частоту, а также число осцилляций, время и скорость нарастания сигналов АЭ. Особенностью этого метода является непосредственное использование координат источника сигнала АЭ, что повышает «компактность» кластера, но затрудняет обработку слабых и зашумленных сигналов. Третьим был метод кластеризации по форме сигналов АЭ, который использовался в качестве эталона для сравнения.

Два положения имитатора должны были привести к образованию двух кластеров сигналов АЭ (рис.1). Поскольку число сигналов имитатора в каждом положении датчика было известно, то достоверность определялась как процент сигналов, соотнесенных с соответствующим кластером. При использовании для расчетов исходных данных, все методы кластеризации дали высокую достоверность разделения источников.

Далее условия кластеризации искусственно ухудшались путем добавления к оцифрованной форме сигналов АЭ случайного шума, распределенного по нормальному закону. При этом варьировался параметр среднеквадратического отклонения (СКО) шума. В результате воздействия моделируемого шума затруднялось определение времени прихода сигналов АЭ, ухудшалась локализация, вносились искажения в рассчитываемые параметры сигналов. Вследствие использования нормально распределенной шумовой добавки, вносилось

равномерное искажение в спектральные характеристики сигналов АЭ по всему диапазону частот. Ожидалось, что метод кластеризации по форме сигнала будет устойчив к таким помехам [3]. При проведении АЭ-диагностики помехи могут быть сосредоточены в определенной области спектра. Методы кластеризации с использованием параметров сигналов АЭ меньше зависят от частотных характеристик шумов. Это следует учитывать при анализе результатов контроля.

Вследствие влияния шума достоверность методов кластеризации понижалась с различной скоростью. Наиболее устойчивым в данном случае оказался метод кластеризации по коэффициенту корреляции формы сигнала. Однако время работы данного метода существенно увеличивается с возрастанием числа сигналов и разнообразия их форм. Метод кластеризации по скорости нарастания переднего фронта при более высокой скорости работы показал значительное падение достоверности уже при значении СКО шума в 30 % от амплитуды быстрой моды сигнала АЭ. Метод кластеризации по параметрам с использованием данных о локализации сигналов АЭ сравним по скорости обработки данных с предыдущим методом. Однако вследствие его значительной зависимости от качества локализации, его достоверность может быстро уменьшаться для некоторых источников. Так, для второго источника сигналов АЭ, расположенного на краю зоны локализации (рис.1), сразу же отмечено резкое падение достоверности его работы. Это означает, что дополнительное уточнение локализации отдельных сигналов АЭ (локализованных с наибольшей погрешностью) может улучшить результаты работы метода.

Метод кластеризации по параметрам сигналов АЭ надежен при работе с сигналами АЭ, локализованными с достаточной для практического использования точностью в (3..5) %. Он был выбран для разработки метода АЭ-контроля процесса сварки в реальном времени. Процесс сварки характеризуется одновременной регистрацией сигналов АЭ от множественных источников. В результате кластерного анализа формируется множество кластеров, некоторые из которых не соотносятся с реальными источниками сигналов АЭ, то есть являются ложными. Для выявления таких кластеров необходима методика оценки достоверности результатов кластеризации при неизвестном заранее количестве источников сигналов АЭ. Такую оценку можно осуществлять путем статистического анализа распределений различных параметров внутри полученных кластеров. Физическим смыслом такого анализа является поиск сигналов АЭ, близких между собой по основным параметрам, и оценка меры близости в сформированном кластере. При этом предполагается, что кластеры, сформированные из

сигналов, не относящихся к одному и тому же источнику, должны быть статистически неоднородны, в отличие от кластеров, соответствующих опасным дефектам, генерирующим близкие по характеристикам сигналы АЭ.

Степень однородности кластеров предлагается оценивать по входящим в них сигналам АЭ. При этом вначале выбирается контрольная группа параметров. Затем для каждого параметра p (из выбранных внутри каждого кластера) вычисляются следующие величины:

- выборочная дисперсия распределения параметра D_p и СКО $\sigma = \sqrt{D_p}$;
- центральный момент распределения четвертого порядка μ_p^4 ;
- квантили распределения $\zeta_{1/4}$, $\zeta_{3/4}$.

Квантиль ζ_z , $z = 1/4$ или $z = 3/4$, определяется как точка на числовой оси, в которой функция распределения переходит от значений, меньших z , к значениям, большим z :

$$(\zeta_z)_J : F_J(\zeta_z - \varepsilon) < Z; F_J(\zeta_z + \varepsilon) > Z$$

где $(\zeta_z)_J$ – квантиль распределения в кластере с номером J ; $F_J(x)$ – функция распределения рассматриваемого параметра в кластере J ; $\varepsilon > 0$ – малая положительная величина, имеющая смысл погрешности определения квантиля.

С использованием указанных величин можно вычислить следующие характеристики внутрикластерного распределения параметра p сигнала АЭ:

1. *Экссесс* γ распределения, который может служить мерой однородности составляющих его сигналов [4-5]:

$$\gamma = \frac{\mu_p^4}{D_p^2} - 3.$$

Смысл эксцесса γ , как статистического параметра распределения случайной величины, состоит в сравнении экспериментальной функции плотности распределения с функцией плотности нормального распределения. Если локальный максимум функции плотности выражен более явно, чем у нормального распределения (т.е. наблюдаемая величина хорошо сгруппирована в области локального максимума), то эксцесс положителен.

2. *Интерквартильная широта* E , характеризующая разброс любых параметров в кластере [4]:

$$E = \zeta_{3/4} - \zeta_{1/4}.$$

Сравнение интерквартильной широты с СКО характеризует степень однородности значений рассматриваемого параметра в кластере.

Достоверность кластера полагалась достаточной при выполнении для набора параметров сигналов АЭ в кластере условий однородности:

$$\begin{cases} \gamma \geq 0 \\ E \leq \sigma \end{cases}$$

Предлагаемый метод был проверен экспериментально при АЭ-контроле сварки стального образца (рис. 2).

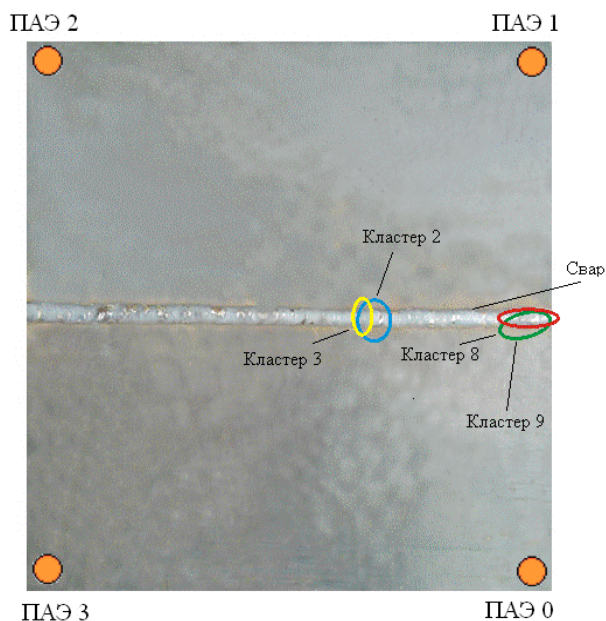


Рис. 2. Расположение кластеров локализованных сигналов АЭ относительно принимающих датчиков и сварного шва

Параметры сигналов АЭ, зарегистрированных каждым датчиком, рассматривались независимо. Затем проверялись условия однородности по параметрам, вычисленным для пар датчиков, для которых расстояние до любого источника в сварном шве одинаково (т.е. по парам ПАЭ 0 – ПАЭ 1 и ПАЭ 2 – ПАЭ 3). Таким образом, минимизировались искажения параметров сигналов АЭ, связанные с разным временем их распространения до принимающих датчиков. Результаты анализа показали, что однородным по углу наклона переднего фронта следует считать кластер 8, по длительности переднего фронта – кластеры 3, 8, 9, по числу осцилляций – кластеры 3, 9. После проведения ультразвукового контроля (УЗК) кластеры были соотнесены с двумя обнаруженными дефектами сварки, расположенными в местах локализации этих кластеров в сварном шве. Также с одним из дефектов был соотнесен кластер 2, однородность которого была сочтена недостаточной. Поэтому был сделан вывод о том, что в результате применения описанной методики возможны ошибки второго рода («ошибка пропуска цели»).

Поэтому метод оценки однородности кластеров применялся в сочетании с методом оценки степени опасности источника сигналов АЭ по медиане распределения энергии сигналов кластера [5].

Выводы

1. Применение алгоритмов кластеризации, обеспечивающих высокую достоверность результатов, приводит к существенному увеличению времени вычислений, что затрудняет их использование. Для применения упрощенных алгоритмов необходима оценка достоверности кластеризации.

2. Упрощенные методы обработки сокращают время выполнения кластерного анализа, но при этом уменьшают его достоверность. При использовании рассматриваемого метода кластеризации по параметрам сигналов АЭ важное значение играет предварительное уточнение локализации отдельных сигналов АЭ.

3. Для оценки достоверности результатов кластерного анализа АЭ-информации рассматривались распределения параметров совокупности объединяемых в кластер сигналов АЭ методами математической статистики. Достоверность кластера полагалась достаточной при выполнении для набора параметров сигналов АЭ в кластере условий однородности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мандель И.Д. Кластерный анализ.– М.: Финансы и статистика, 1988. – 176 с.
2. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И. и др. Акустико-эмиссионный контроль авиационных конструкций. / под ред. Л.Н. Степановой, А.Н. Серьезнова. – М.: Машиностроение, 2008. - 440 с.
3. Дж. Бендат. Основы теории случайных шумов и ее применения. М: Наука, 1965. - 464 с.
4. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика – М.: Физматлит, 2000. -496 с.
5. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Рамазанов И.С. Анализ структуры кластеров сигналов акустической эмиссии для оценки степени опасности дефектов сварки. // Контроль. Диагностика. 2011. № 3. С.68 - 72.

МЕТОДЫ НЕЛИНЕЙНОГО ОБРАТНОГО ПРОЕЦИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МАЛОРАКУРСНОЙ ТОМОГРАФИИ В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ

Баранов В.А., Эверт У.*, Кренинг Х.-М., Бразовский В.В., Учайкина Е.С., Кулешов В.К.

Институт неразрушающего контроля, Томский политехнический университет

*Bundesanstalt für Materialforschung und prüfung, г. Берлин, Германия

E-mail: ram1@mail.tomsknet.ru

Методы нелинейного обратного проецирования

В настоящее время усилился интерес исследователей к нелинейным статистическим методам решения реконструктивных задач, которые в своей изначальной постановке являются линейными и детерминистскими [1-10]. Среди факторов, обуславливающих данную тенденцию, необходимо отметить следующие: 1) нелинейные оценки решений интегральных проекционных уравнений, как правило, значительно более точны, чем линейные, и могут быть получены без дополнительных вычислительных затрат,

2) они работоспособны при восстановлении изображений по неполным данным, в то время как для многих практически важных задач данного класса подходы, основанные на линейных оценках непригодны в принципе,

3) априорная информация о восстанавливаемом объекте естественным образом учитывается в форме нелинейных статистических ограничений на решение,

4) статистический подход позволяет разрабатывать «мягкие» математические модели, преодолевая тем самым «жесткость» детерминистских методов в которых опытные данные и лежащие в основе решения задачи гипотезы часто оказываются несовместными,

5) статистические методы более, чем детерминистские, пригодны для решения синтетических задач, поскольку в них имеются пригодные для этой цели формальные процедуры («решающие правила», «решающих функции» и т.п.).

Среди методов этого класса наиболее последовательными и концептуально безупречными являются методы, основанные на вариационных принципах статистики (максимума энтропии [10], максимального правдоподобия и др.), однако сфера их применимости достаточно ограничена прежде всего благодаря отсутствию гибкости в учете специфики объекта контроля, что, приводит к известной «бедности» синтезированных изображений конкретным содержанием, а иногда и к грубым артефактам. Отмеченные недостатки в значительной степени преодолены в рамках «структурно-ориентированного» подхода [9] к исследованию и реконструкции объектов. Разработанные прежде этого подхода методы нелинейного обратного проецирования [1-7]

оказались тесно связанными с ним как идеологически, так и технически. «Математическая техника» нелинейного обратного проецирования активно используется в нем для конструирования «мер сходства» и «мер различия» как неклассических статистик [8,9].

Концепция обратного проецирования является одной из старейших и в то же время одной из наиболее жизнеспособных в томографии.

Функция $t(x, y, z)$, описывающая внутреннее строение объекта исследования, должна быть решением системы N интегральных проекционных уравнений. Луч-суммы $P_n(x, y, z)$, инцидентные точке (x, y, z) объекта контроля, определены во всем объекте, хотя и измеряются на какой-то «плоскости регистрации». (Здесь N число ракурсов, а n номер ракурса). Базовой оценкой для $t(x, y, z)$, в классическом методе обратных проекций является линейное усреднение (т.е. средне-арифметическое):

$$T(x, y, z) = (P_1 + P_2 + \dots + P_N) / N. \quad (1)$$

Характерно, что, несмотря на обилие новых реконструктивных алгоритмов, наиболее часто употребляемые среди них это модификации метода обратных проекций. Осуществляемые путем внесения в этот базовый «суммационный» алгоритм (1) различных процедур фильтрации — предобработки проекций и постобработки томограмм (таких, например, как «метод обратных проекций с фильтрацией сверткой» и пр.). В рамках этих модификаций относительно легко могут быть решены проблемы с «некорректностью» задачи реконструкции путем специальной фильтрации с учетом особенностей типичного объекта контроля. К сожалению, этим путем преодолевается лишь «слабая некорректность» и такого рода методы применимы лишь для решения многокурсовых задач.

В работах [1, 6, 4] была осуществлена более радикальная модификация классического обратного проецирования за счет смены самой базовой оценки на нелинейную:

$$T(x, y, z) = f(P_1, P_2, \dots, P_N) \quad (2),$$

где функция f инвариантна относительно любых перестановок своих неотрицательных аргументов, т.е. это есть нелинейное усреднение. Были изучены различные классы оценок (2), среди

которых в практике решения реконструктивных задач наиболее употребительны порядковые статистики. Дальнейшее совершенствование методов (2) нелинейного обратного проецирования достигается за счет процедур предобработки и постобработки, т.е. как и в случае (1), базовая оценка (2) «обрастает» техникой фильтрации. Для этой цели систематически используются структурно-ориентированные (т.е. теоретико-групповые статистические) методы обработки изображений [9]. В отличие от модификаций (1) методы нелинейного обратного проецирования (МНЛОП) пригодны для решения остро некорректных задач, в частности они вполне адекватны для решения задач малоразмерной томографии.

С математической точки зрения МНЛОП уже хорошо изучены [4, 6]. В частности, показано, что метод минимальных проекций (частный случай (2) с использованием в качестве f первой порядковой статистики) является решением задачи минимизации с ограничениями для норм невязок на классе нелинейных усреднений. Проведено сравнение классического обратного проецирования с методом минимальных проекций. Выявлены связи между МНЛОП и известными методами ПНВМ (проекции на выпуклые множества) [11]. Разработаны итерационные методы НЛОП.

К настоящему моменту на основе этих методов (известных также как методы «нелинейного томосинтеза») решен ряд актуальных задач неразрушающего контроля. Перечислим некоторые из них:

- контроль крупногабаритных изделий (деталей машин, компонентов авиационной и космической техники и т.п.) с использованием малогабаритных бетатронов и линейных ускорителей в качестве источников излучений;
- контроль микросхем и других изделий микроэлектроники;
- контроль компонентов ядерных реакторов и атомных электростанций в действии (в особенности томографическая визуализация трещин в работающих компонентах);
- диагностика сварных швов;
- контроль строительных конструкций (в частности, железобетонных стен, толщиной до 0.6 м.);
- контроль багажа на транспорте в условиях террористической угрозы;
- решение некоторых задач обработки изображений в криминалистике;
- томографическое исследование произведений искусства и памятников архитектуры.

Поскольку данный класс реконструктивных методов пока еще недостаточно полно представлен в печати, задачей этой короткой статьи является дать о нем самое общее представление и проиллюстрировать некоторыми примерами.

«Бетатронная томография» на основе нелинейного обратного проецирования

Для иллюстрации возможностей томосинтеза рассмотрим пример послойной визуализации стального слитка (после обработке на обжимном стане) размерами 250*120*60 мм. (Эксперимент был подготовлен и осуществлен совместно с коллегами из Фраунгоферовского института IzfP, Саарбрюккен, Германия).

Объект контроля просвечивался малогабаритным бетатроном МИБ-6 и проекции регистрировались на рентгеновской пленке. Каждая из проекций соответствует определенному положению объекта на поворотном столе. Шаг угла поворота был равен 45°. (Кассета с пленкой поворачивалась вместе с объектом). Фокусное расстояние было равно 890 мм, расстояние от источника излучения до оси вращения — 250 мм. Проекционные изображения на пленках оцифровывались при помощи автоматического микроденситометра. На рис.1 представлены 8 нефильтрованных радиографических проекций объекта.

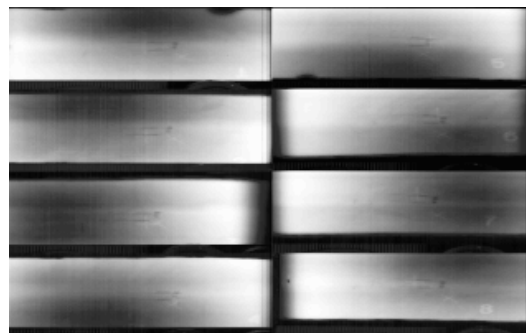


Рис. 1. Восемь радиографических проекций стального слитка

На рис. 2 – рис. 4 представлены 3 томограммы объекта, синтезированные по набору из 8 фильтрованных проекций (использовался вариант локально-линейной фильтрации) двумя способами. Вверху — по классическому методу обратных проекций. Внизу — по одному из вариантов нелинейного обратного проецирования. (В этом случае в качестве оценки НЛОП использовался аналог 2-й порядковой статистики, точнее, из 8 луч-сумм выбиралась 2-я по близости к низкочастотному «тренду» соответствующей проекции). На всех томограммах видны пустоты в куске стали на соответствующей глубине залегания.

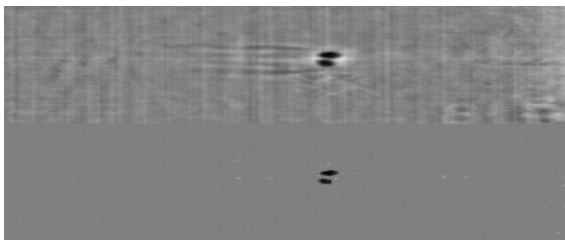


Рис. 2. Томограммы для слоя с глубиной залегания $Z = 0.34$

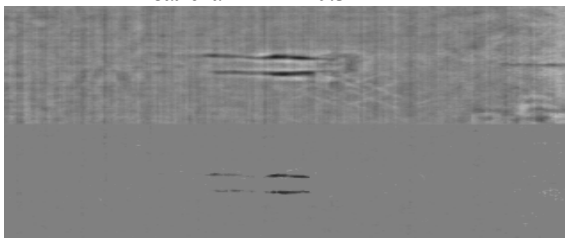


Рис. 3. Томограммы для слоя с глубиной залегания $Z = 0.61$

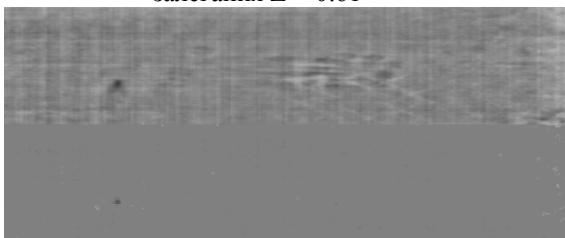


Рис. 4. Томограммы для слоя с глубиной залегания $Z = 0.85$

Томограммам на рис.2, рис.3 и рис.4 соответствуют глубины залеганий $Z = 0.34$, $Z = 0.61$ и $Z = 0.85$, которые даны в относительных единицах ($Z = 0.0$ соответствует метке на нижней стороне объекта и $Z = 1.0$ - на верхней).

Сравнение результатов, полученных двумя методами, позволяет оценить преимущества НЛОП. Синтез по классическому методу обратных проекций дает большое количество артефактов (превосходящих по амплитуде полезный сигнал), что не обеспечивает надежную диагностику. Синтез по методу НЛОП с соответствующим типом фильтрации и выбором параметров оценок НЛОП позволяет сразу же отсеять большой объем ненужной информации (в частности, информацию о низкочастотной составляющей проекций) и радикально упростить ситуацию, не нарушая структуры дефектов.

Фактически, томограммы по методу НЛОП представляют собой «карты дефектности». Они точны, хотя и упрощены. Если бы в дополнение к МНЛОП была проведена еще реконструкция объекта по полному (т.е. 100-200) набору проекций в лабораторных условиях, скажем, по алгоритму Feldkamp, она не обеспечила бы дефектоскописту нового знания об объекте контроля (знания, а не информации). Поскольку такая реконструкция была бы перегружена «пустой» (не нагруженной смыслом) информацией, затрудняющей выбор правильных

решений, то потребовалось бы дополнительная работа по ее редуцированию в приемлемую форму. Проблема редуцирования данных на начальном этапе реконструкции является весьма актуальной в современной томографии.

Результаты и выводы

Метод обратного проецирования был и остается концептуально привлекательным для томографической 3D-реконструкции. Среди его достоинств — возможность визуализировать каждое отдельное сечение объекта контроля независимо от остальных. (как и в классическом томосинтезе) Попытки улучшить классический алгоритм в его цифровых реализациях за счет линейной фильтрации приводят к успеху только при большом числе ракурсов (сотни) и только при «слабой некорректности» Для того, чтобы сделать метод работоспособным при малом (4-8) числе ракурсов необходимо использовать оценки нелинейного обратного проецирования. Дальнейшее усовершенствование метода требует вовлечения в алгоритм нелинейной фильтрации, основанной на структурно-ориентированном подходе к обработке изображений.

Авторы выражают благодарность проф. В. Моргнеру (Людвигсхаген, Германия), Д-ру У.Шерпелю (Берлин, Германия) и коллегам по НИИ НК (Томск) В.А.Касьянову и В.В.Романову за помощь в экспериментальной части работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов В.А., Чекалин А.С. Система цифрового томосинтеза для неразрушающего контроля // Дефектоскопия. – 1988. – № 5. – С. 30–36.
2. Baranov V., Chakhlov V., Kröning M., Morgner W. High speed computerized tomography on thick-walled steel and concrete components using a portable 6 MeV betatron // 6th European Conference on Non-destructive testing: Collect. of papers. – Nice, France, 1994. – № 2. – P. 1287–1291.
3. Baranov V.A., Temnik A.K., Chakhlov V.L., Chekalin A.S. Betatron tomography with the use of nonlinear backprojection techniques // International Symposium on Computerized Tomography for Industrial Applications: Collect. of papers. – Berlin, 1994. – P. 271–277.
4. Baranov V.A. Convex projections reconstruction algorithms on the basis of non-linear backprojection approach // International Symposium on Computerized Tomography for Industrial Applications: Collect. of papers. – Berlin, 1994. – P. 88–95.
5. Ewert U., Schumm A., Nockeman C., Baranov V.A. Fortschritte auf dem Gebiet der digitalen Laminographie // Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., Jahrestagung 1995 (100 Jahre Röntgenstrahlen und die heutige Vielfalt

Industrieller ZfP-Praxis), Aachen. – 1995. – S. 471–475.

6. Baranov V.A. A Variational Approach to Non-Linear Backprojection // Computerized Tomography: Collect. of papers / Editor-in-Chief: M.M. Lavrent'ev. – Utrecht, Netherlands, 1995. – P. 82–97.

7. Ewert U., Baranov V., Borchard K. Cross-sectional imaging of building elements by new non-linear tomosynthesis technique using imaging plates and Co⁶⁰ radiation // NDT & E International, Elsevier Science Ltd. – 1997. – V. 30. – № 4. – P. 243–248.

8. Баранов В.А., Бразовский В.В., Эверт У., Редмер Б. Структурно-ориентированная визуализация зон образования трещин в компонентах атомных электростанций // Естественные и технические науки, № 5, 2010, стр. 386-391.

9. Баранов В.А., Бразовский В.В., Ивженко О.О., Эверт У. Структурно-ориентированный подход к обработке изображений // Естественные и технические науки, № 5, 2010, стр. 407-413

10. Wernecke S.I. and d'Addario L.R. Maximum entropy image restoration // IEEE Trans, Comput. C-26, 351-364 (1977).

11. Youla Dante C., Generalized Image Restoration by the Method of Alternative Orthogonal Projections // IEEE Trans. on Circuits and Systems, CAS-25(9). 694-702 (1978).

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ГЕНЕРАТОРНЫХ МОДУЛЕЙ НА ДИОДАХ ГАННА ДЛЯ СИСТЕМ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНОГО КОНТРОЛЯ

Пушкарев В.П., Пелявин Д.Ю., Юрченко В.И., Жарских В.Д.

Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов»

634034, Россия, г. Томск, ул. Красноармейская, д. 99а, Отдел оптических систем

E-mail: vpp@radiosibir.ru

В докладе представлены результаты экспериментального исследования СВЧ характеристик импульсных генераторных модулей выполненных на диодах Ганна 3А762 и 3А750 в 3-х сантиметровом диапазоне длин волн. Стабильные характеристики получены благодаря самоуправляемому ограничителю однополярных импульсных сигналов и трех каскадному усилителю мощности. Рассмотрена динамика изменения мощностных и спектральных характеристик в диапазоне температур +85 ...-60⁰С.

В настоящее время в системах активно-импульсного контроля широко применяются импульсные СВЧ генераторные модули. Используемые в настоящее время в системах ближней радиолокации и радионавигации

импульсные СВЧ генераторы на магнетронах имеют большой вес, габариты и требуют высоковольтного питания. В то же время выпускаемые промышленностью диоды Ганна типа 3А750, 3А762, и лавинно-пролетные диоды типа 3А765, 3А766 позволяют разрабатывать СВЧ генераторы с выходной импульсной мощностью до 40 Вт в диапазоне частот 8...96 ГГц [1]. В работе описан СВЧ генераторный модуль с габаритными размерами 46×42×36 мм, управляемый микропроцессором, генерирующим импульсы управления ТТЛ-уровня. Генератор состоит из ограничителя амплитуды импульсов управления (далее ограничитель), возбуждителя, и резонаторной камеры с диодом Ганна типа 3А762А или 3А750К.

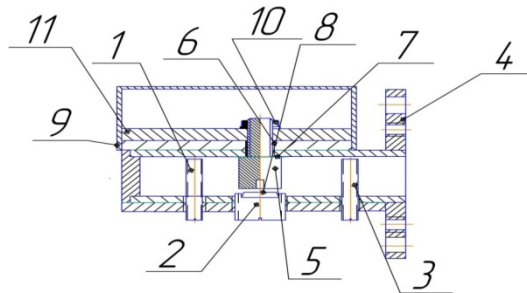


Рис.1 Схематическое изображение модуля М312001

Резонансная камера М312001 на рисунке 1 состоит из волноводной части 4, в которую входят остальные составные части: регулировочный винт 1, регулирующий частоту, зажима диода Ганна 2, с помещённой в него «П» образной пружины 8, регулировочного винта 3, регулирующего мощность. Во внутреннюю часть камеры вставляется радиатор 5, между радиатором и стенкой волновода ставится слюдяная прокладка 7 и фторопластовая прокладка 6. Гайкой 10 радиатор прикручивается к плате 11 и запаивается. Чтобы оградить электрическую часть модуля от влаги, механических повреждений, попадания грязи и др., она закрывается защитным экраном 9. Управление генераторным модулем может быть обеспечено сигналами ТТЛ – уровня от внешнего импульсного генератора или микроконтроллера. Для обеспечения контроля и синхронизации модуля предусмотрен контрольный выход. Резонаторная камера

выполнена из волновода сечением 23×10 мм и длиной 46 мм. Генераторный диод Ганна устанавливается внутри волновода на расстоянии 3/4 длины волны генерируемого колебания от закрытого металлической заглушкой края волновода. Особенности конструктивной реализации генераторного модуля М312001 показаны на рис. 2.

Технические характеристики СВЧ генераторного модуля:

- амплитуда сигнала запуска – уровень ТТЛ;
- импульсная СВЧ мощность – 40 Вт;
- значение несущей частоты – 8...12 ГГц;
- длительность импульсов запуска – 300...1000 нс;
- длительность фронта генерируемых радиоимпульсов – 10 нс;
- скважность генерируемых импульсов, не менее 500



Рис. 2. Конструкция генераторного модуля

Для стабильной работы СВЧ генератора требуется стабилизация напряжения возбуждения диода Ганна. В случае работы импульсного возбудителя от микропроцессора, генерирующего импульсы управления ТТЛ-уровня, напряжение возбуждения оказывается нестабилизированным. Это приводит к изменению генерируемой мощности и частоты генерации [3].

В цифровой технике в качестве ограничителя импульсов используют, как правило, компараторы. Недостатком таких ограничителей

является увеличение длительности формируемых компаратором импульсов с увеличением амплитуды входных воздействий, что связано с насыщением транзисторов компаратора. В системах ближней радиолокации изменение длительности излучаемых импульсов недопустимо, ввиду уменьшения точности производимых с помощью указанных систем измерений.

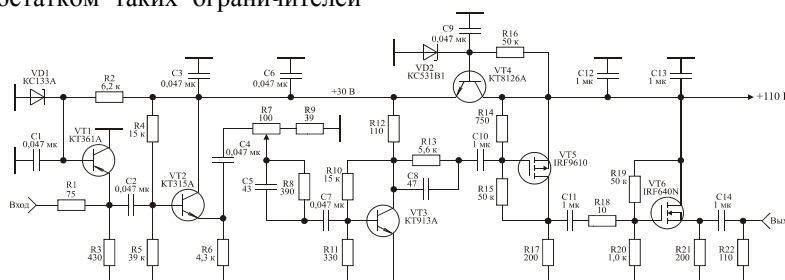


Рис. 3. Принципиальная схема ограничителя и возбудителя

С целью создания ограничителя, обеспечивающего стабилизацию амплитуды и длительности выходных импульсов при многократном изменении амплитуды импульсов на его входе, была использована схема управления амплитудой однополярных импульсных сигналов, описанная в [5].

Ограничитель содержит: транзистор VT1, играющий роль самоуправяемого ограничителя однополярных импульсных сигналов; стабилизатор напряжения на стабилитроне VD1 и резисторе R2; делитель напряжения на резисторах R1 и R3; эмиттерный повторитель на транзисторе VT2.

Самоуправляемый ограничитель на транзисторе VT1 работает следующим образом. На базу транзистора VT1 со стабилизатора напряжения на стабилитроне VD1 и резисторе R2 подается постоянное запирающее оба перехода транзистора VT1 напряжение. В случае использования р-п-р транзистора, как показано на рис. 3, это напряжение положительное. При подаче на вход ограничителя импульсов положительной полярности, транзистор VT1 будет

заперт до тех пор, пока амплитуда указанных импульсов будет меньше запирающего напряжения, подаваемого на базу транзистора VT1. При превышении амплитудой входных импульсов значения запирающего напряжения, транзистор VT1 открывается, и его входное сопротивление будет составлять доли Ом. В этом случае транзистор VT1 играет роль самоуправяемого ограничителя.

Делитель напряжения на резисторах R1 и R3 необходим для сохранения работоспособности ограничителя при работе от генератора с малым выходным сопротивлением. В этом случае при отсутствии делителя на резисторах R1 и R3, шунтирующее действие транзистора VT1 будет уменьшаться и может привести к выходу из строя генератора с малым выходным сопротивлением, либо выгоранию транзистора VT1.

Эмиттерный повторитель необходим для сохранения работоспособности ограничителя в случае его работы на низкоомную нагрузку. Использование эмиттерного повторителя позволяет сохранять неизменной амплитуду выходных импульсов при работе на произвольное

сопротивление нагрузки, ограниченное допустимым импульсным током транзистора VT2.

Важным параметром ограничителя является неизменность формы и амплитуды выходного импульса при изменении амплитуды входного сигнала. Экспериментальные исследования показали, что, при изменении амплитуды входных импульсов в пределах от 4 до 20 В, амплитуда выходных импульсов изменяется в пределах от 3,2 В до 3,36 В. Важно и то, что изменение амплитуды входного воздействия не приводит к увеличению длительности выходных импульсов, что характерно для классических схем на основе компараторов. При этом выброс на переднем фронте импульса, в рассматриваемом диапазоне амплитуд входных сигналов, не превышает 3 %.

Возбудитель содержит три каскада усиления на транзисторах VT3, VT5, VT6, и стабилизатор напряжения на транзисторе VT4, предназначенный для питания ограничителя и первого каскада возбудителя.

В первых двух каскадах возбудителя использованы корректирующие цепи первого порядка (элементы C5, R8 и C8, R13), обеспечивающие высокие технические показатели, не смотря на свою простоту [4]. Достоинством таких цепей является отсутствие выброса на переднем фронте усиливаемого

импульса при изменении коэффициента усиления каскада от максимального значения до значения равного единице.

Особенностью работы диодов Ганна типа 3A750, 3A762, и лавинно-пролетных диодов типа 3A765, 3A766 является изменение их сопротивления в процессе возбуждения, и для стабильной работы СВЧ генераторов на этих диодах требуется возбудитель с выходным сопротивлением, составляющим десятые доли Ом. Для реализации указанного требования выходной каскад возбудителя на транзисторе VT5 выполнен по схеме с общим стоком с выходным сопротивлением не более 0,05 Ом. Каскад с общим стоком имеет коэффициент усиления по напряжению близкий к единице, однако обладает большим быстродействием, что позволяет обеспечить время установления фронта импульса возбудителя равным 10 нс при работе на нагрузку с активным сопротивлением 5 Ом. Рабочие импульсные напряжения диодов Ганна типа 3A750, 3A762, и лавинно-пролетных диодов типа 3A765, 3A766 индивидуальны и лежат в диапазоне 10...100 В. Поэтому между ограничителем и возбудителем установлен потенциометр R7 (рис. 3), позволяющий менять выходное импульсное напряжение возбудителя в указанных пределах.

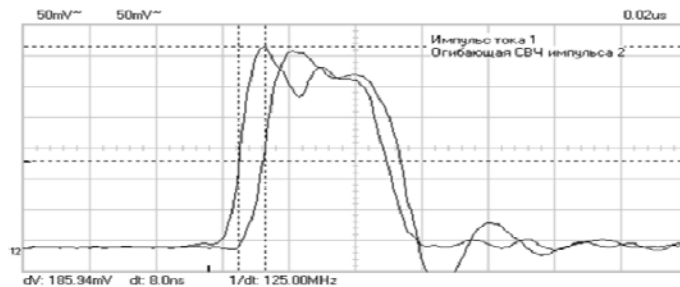


Рис. 4. Временные эпюры напряжений огибающей СВЧ импульса и импульса тока диода Ганна

На рис. 5 – 8 приведены результаты исследования влияния напряжения возбуждения $U_{\text{возб}}$ и скважности генерируемых импульсов Q на частоту генерации и выходную мгновенную мощность рассматриваемого импульсного генераторного модуля на диоде Ганна типа 3A762 при длительности генерируемых импульсов, равной 100 нс. Временные эпюры напряжений огибающей СВЧ импульса и импульса тока диода Ганна близки по форме и показаны на рис. 4.

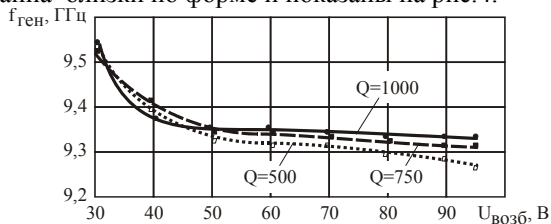


Рис. 5. Зависимость частоты генерации от напряжения возбуждения

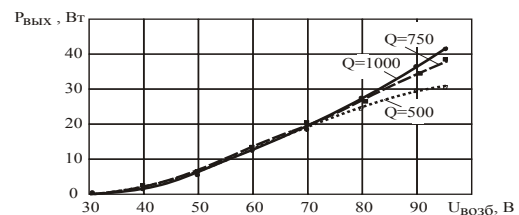


Рис. 6. Зависимость выходной мощности от напряжения возбуждения

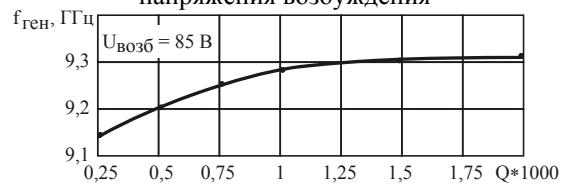


Рис. 7. Зависимость частоты генерации от скважности

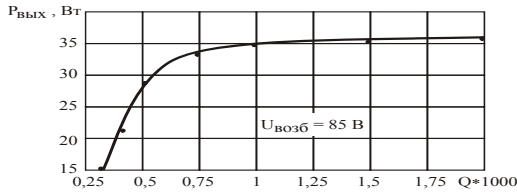


Рис. 8. Зависимость выходной мощности от скважности

Гарантированные характеристики диодов Ганна типа 3А762 достигаются при условиях: $U_{\text{возб}} > 60 \text{ В}$; $Q > 1000$; допустимая температура корпуса $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Из графиков приведенных на рис 5 следует, что при указанных условиях относительный уход частоты на вольт составляет

$$S_u = (\Delta f / f_0) / \Delta U_{\text{возб}} = 1,7 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{В}}$$

Из графиков приведенных на рис. 6 найдем, что изменение выходной мощности на вольт составляет: $S_p = \Delta P / \Delta U_{\text{возб}} = 0,7 \frac{\text{Вт}}{\text{В}}$.

Для определения относительной температурной нестабильности частоты генерации $S_T = (\Delta f / f_0) / \Delta T$ воспользуемся графиком, приведенным на рис. 8. Экспериментально установлено, что уменьшение добротности ниже значения 250 приводит к выгоранию диода Ганна. Можно сделать вывод, что в этом случае, температура корпуса диода превышает значение $100 \text{ }^\circ\text{C}$. С учетом сказанного получим:

$$S_T = 2 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{Т}^\circ\text{C}}$$

И, наконец, из графика приведенного на рис. 8 можно сделать вывод о независимости выходной мощности СВЧ генератора от скважности генерируемых импульсов при условии $Q > 1000$, что соответствует паспортным данным на используемый диод.

С целью более объективного анализа полученных результатов на рис. 9 приведена зависимость мощности, рассеиваемой на диоде Ганна, от скважности генерируемых импульсов. Зависимость получена по результатам измерения методом замещения мгновенного значения тока, потребляемого диодом в режиме генерации. Для диода 3А762 он составляет 20 А.

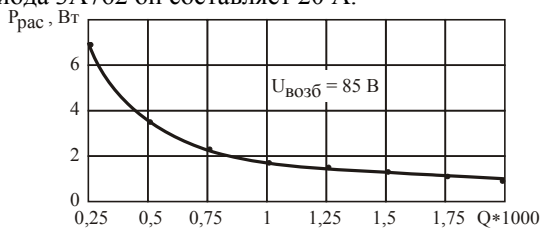


Рис. 9. Зависимость мощности, рассеиваемой на диоде Ганна, от скважности генерируемых импульсов

Полученные нестабильности характеристик рассматриваемого СВЧ генератора качественно совпадают с результатами исследований описанных в [7] и позволяют рекомендовать СВЧ генератор для использования в системах активно-импульсной локации. Предлагаемый генераторный модуль на основе диодов Ганна позволяет заменить импульсные СВЧ генераторы на магнетронах в системах ближней радиолокации, улучшив их энергетические и массогабаритные показатели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юрченко В.И. Разработка и производство в ОАО НИИПП современной электронной компонентной базы для военной техники. Вестник академии военных наук №3,(32) 2010 г., С.193-197
2. Пушкарев В.П., Титов А.А., Юрченко В.И. Унифицированный наносекундный импульсный генераторный модуль сантиметрового диапазона Сб. труд 3 я . Всероссийская научно практ. конф.«Радиовысотометрия 2010» г Каменск-уральский 19-21 октября 2010 г С 158-162.
3. Пушкарев В.П., Титов А.А, Пелявин Д.Ю. Юрченко В.И. Мощный наносекундный импульсный СВЧ генераторный модуль системы радиолокации и навигации. Вестник академии военных наук №3,(32) 2010 г., С.309-312.
4. Пушкарев В.П. , Титов А.А., Авдоченко Б.И. , Пелявин Д.Ю, Юрченко В.И. Импульсный СВЧ генератор на диоде Ганна. Эл. техника. сер1. СВЧ техника Вып 3(506) 2010г., С38-46.
5. Пушкарев В.П., Титов А.А., Юрченко В.И. Устройство управления амплитудой мощных импульсов Материалы 3 й . Общероссийской научно практ. конф.«Обмен опытом в области создания сверхширокополосных РЭС СВЧ 2010» г Омск12-15 октября 2010 г С 158-162.
6. Пушкарев В.П., Титов А.А., Юрченко В.И. Реализация двухканальных сверхширокополосных радиосистем Материалы 3 й . Общероссийской научно практ. конф.«Обмен опытом в области создания сверхширокополосных РЭС СВЧ 2010» г Омск12-15 октября 2010 г С 176-179.
7. Попов В. В. Стабилизация частоты генераторов на диодах Ганна миллиметрового диапазона длин волн // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2009. – № 1. – С. 67–71.

NON DESTRUCTIVE TESTING FOR NUCLEAR POWER PLANT LIFE EXTENTION

Sednev D.A.

Supervisor: Demyanyuk D.G., associate professor, PhD.

Tomsk polytechnic university, 634050 Russia, Tomsk, 30 Lenin str.

E-mail: sednev@sibmail.com

Non-destructive testing (NDT) is a noninvasive technique for determining the integrity of a material, component or structure. Because it allows inspection without interfering with a product's final use, NDT provides an excellent balance between quality control and cost-effectiveness. [1]

The long list of NDT methods and techniques includes: radiographic testing (RT), ultrasonic testing (UT), liquid penetrant testing (PT), magnetic particle testing (MT), eddy current testing (ET), visual testing VT as well as leak testing LT, acoustic emission AE, thermal and infrared testing, microwave testing, strain gauging, holography, acoustic microscopy, computer tomography, non-destructive analytical methods, non-destructive material characterization methods and many more.

The “major six” (or basic) NDT methods, which are largely used in routine services to industry are:

- Visual inspection.
- Liquid penetrant testing.
- Magnetic particle testing.
- Electromagnetic or eddy current testing.
- Radiography.
- Ultrasonic testing [2].

The main goal of NDT is to predict or assess the performance and service life of a component or a system at various stages of manufacturing and service cycles. NDT is used for quality control of the facilities and products, and for fitness or purpose assessment (so-called plant life assessment) to evaluate remaining operation life of nuclear power plant (NPP) components, such as processing lines, pipes and vessels. Monitoring feedback of these components takes essential role due to large exposure by hydrogen damage (mostly it is hydrogen embrittlement) [3].

Non destructive testing technology as applied for plant life assessment (PLA) is a trend in many developed and developing countries. PLA plays a great role for nuclear engineering due to about 40 years life time of majority of world's nuclear power plants (Fig.1).

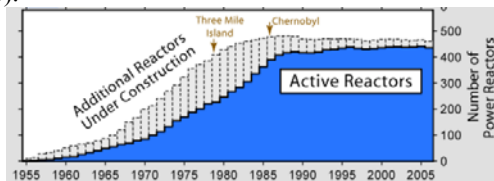


Fig.1. Timeline of world's NPP construction

NDT for plant life assessment deals with application of NDT techniques to detect discontinuities in an industrial manufacturing process that can affect the mechanical strength of a product and may cause its premature failure. Plant life assessment in many cases means the remaining life assessment of a structure, component or product.

NDT life assessment services include:

- Equipment integrity analysis.
- Corrosion monitoring of structures and equipment.
- Corrosion damage evaluation.
- Fatigue and creep damage prediction.
- Fitness-for-service evaluation [4].

An industrial product is designed to perform a certain function for a certain period of time to the satisfaction of its user. In older design procedures, the presence of the discontinuities was taken care of by including a safety factor in the design of the product. But nowadays since high emphasis is being placed on the use of as little material as possible to reduce the cost and weight, the presence of discontinuities is no way tolerable.

The pace of change in the power generation and petrochemical industries has never been higher with a continuing move from principles of “engineering excellence” to a highly commercial management style aimed at maximizing company profits and minimizing corporate exposure. [5] In this competitive arena, there is increased emphasis on maintaining plant and equipment in productive use well beyond its original design date. This must be achieved without increasing the risk to plant safety, personnel or the environment. Increasingly, run/repair decisions must be made for old, or even new, plant components containing service induced and design allowable defects, based on state of the art analysis and life assessment techniques.

Plant life assessment is applied to any kind of processing lines, structures, vessels or pipes which are designed to operate for a specific life time taking account the temperature, corrosion and material. To ensure extended life operation of processing lines beyond design life a policy of NDT routine inspections has to be outlined. To assess and monitor the quality of the product during its manufacturing and service life without interfering with service performance of the product the NDT techniques provide the best choice. On line and on-site NDT techniques are used for plant life assessment.

Assessing the condition and remaining life of power plant components operating at high temperatures and at high stresses is necessary to optimize inspection and maintenance schedules, to make “RUN, REPAIR, REPLACE” decisions and to avoid unplanned outages. [4] While two different approaches are available for residual life assessment of power plant components, one using data analysis based on operational history and the other based on periodic examination of critical components, the latter method is widely adopted as it is more accurate since it does not rely on standard material data with their associated uncertainties and does not necessarily require knowledge of the operational stress-temperature data.

Any engineering component, when put in service, is designed to last for definite period referred to as “design life” of the component. There are many factors, which adversely affect the define life and lead to premature retirement of the component from service. Such factors include unanticipated stresses (residual services), operation outside designed limit (excessive temperature, load cycling), environmental effects, degradation of material properties in service etc. On the other hand, there can be some favorable factors, which result in lesser degradation of the component then expected in his design life. [4]

Assessment of structural integrity requires three inputs:

- Material properties (e.g. yield strength, fracture toughness etc.).
- Flaw characteristics (type, location, size, shape, orientation).
- Stresses (residual, service). [6]

NDT has been traditionally used for flaw characterization and measurement of residual stress. In the last 10–15 years, extensive studies have been reported on material characterization by NDT. Combining these inputs many parameters, including mechanical properties, factor of safety in design, conservative operation of unit, inaccuracy in data extrapolation, overestimation of corrosion effects etc, can be assessed. Since constructing a new plant is always much more expensive than extending the life of existing plants these parameters are vital for plant maintenance and normal performance in long run. In this regard, NDT provides all the three vital inputs necessary for assessment of structural integrity of a plant.

Residual life assessment (RLA) and plant life extension (PLEX) are complementary terms to plant life assessment (PLA). Life extension of engineering components is based on the principle that flaw size at the end of extended life will be less than that the critical value, with appropriate safety factor, and it is economical to operate the flawed component safely. NDT methods selected for residual life assessment have

high reliability and not necessarily high sensitivity. The concept of “How small a flaw can be detected?” is replaced by “How large a flaw can be missed?” The topic of RLA and PLEX is of national importance since many operating power, chemical and petrochemical plants are approaching their end of design life [7].

As more and more power plant equipments are reaching their designed life, utility owners are forced to take vital decisions on “RUN, REPAIR, REPLACE” for different components. Innovative NDT techniques are developed continuously and, coupled with on-line monitoring and special computer programs, the decision making process has become more realistic and cost saving. But not only innovative techniques helps make a right decision, innovative approaches to risks management also helps. Today, NPP owners mostly use deterministic approach to risks evaluation. The main idea is determine a “upper limit” for each unit of NPP, when flaws in materials become higher then upper limit – we should replace it. (Fig.2) [8]

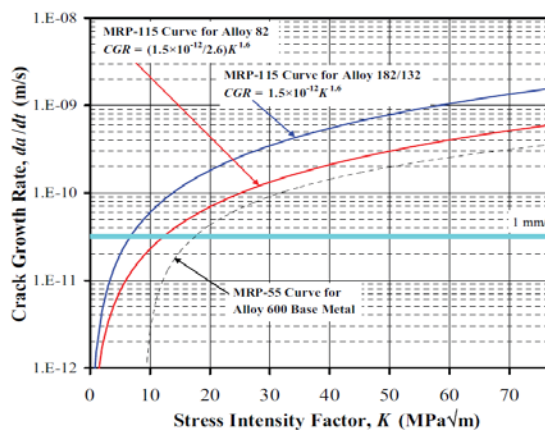


Fig.2. Example of deterministic approach

There are two big disadvantages: the first one is using qualitative characteristics of flaws, but not quantitative. That’s why we couldn’t predict future growth of flaws and always take a replace decision. The second one is using a conservative approach. This means that in deterministic approach we always should overestimated risks of flaw growth.

All these problems could be solved by using probabilistic approach in couple with quantitative NDT techniques. This approach let the NPP owner acquire a failure probability of each unit. And it lets make a right cost-saving decision.

REFERENCES

1. Guidebook for the fabrication of non-destructive testing test specimens, IAEA, Vienna, 2001 Printed by the IAEA in Austria June 2001
2. General Introduction to NDT Presentation - NDT Resource Center, www.ndt-

ed.org/GeneralResources/IntroToNDT/Intro_to_NDT.ppt

3. Training guidelines in non-destructive testing techniques 2008 edition, IAEA, Vienna, 2008 Printed by the IAEA in Austria December 2008

4. Non-destructive testing for plant life assessment, IAEA, Vienna, 2005 Printed by the IAEA in Austria August 2005

5. Role of NDT in Nuclear Power Plant Management - 3rd International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, November 14-16, 2001, Seville Spain.
<http://www.ndt.net/abstract/ndesi01/data/80.htm>

6. L.M.Davies LMD Consultancy, England B. Gueorguiev, P. Trampus IAEA - Role of NDT in condition based maintenance of nuclear power plant components

<http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn078/idn078.htm>

7. Leonard J. Bond, Senior Member IEEE, Tom T. Taylor, Steven R. Doctor, Senior Member IEEE, Amy B. Hull, and Shah N. Malik - Proactive Management of Materials Degradation for Nuclear Power Plant Systems - International Conference on Prognostics and Health Management – 2008

8. G.A. White, N. N. (2005). Development of Crack Growth Rate Disposition Curves for Primary Water Stress Corrosion Cracking (PWSCC) of Alloy 82, 182, and 132 Weldments. Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors- (S. 511 - 531). TMS (The Minerals, Metals & Materials Society).

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Сыч Т.В., Герасимов С.И., Кулешов В.К.

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: Gerasimov@stu.ru

Приведены результаты численного и физического моделирования процессов распространения упругих волн в однородных линейных, плоских и объемных телах. Численно получены характеристики продольных волн в зависимости от граничных условий – жесткое и шарнирное закрепление, граница раздела сред. Исследованы волноводные свойства моделей вблизи геометрических концентраторов в виде отверстия и трещины при импульсном внешнем воздействии. Рассчитаны поля динамических перемещений и напряжений.

Введение

До последнего времени для решения задач неразрушающего контроля широкое применение находят ультразвуковые и акустические методы. Теория и практика использования таких методов хорошо разработаны, серийно выпускается соответствующая аппаратура.

Серьезный повод к пересмотру сложившихся взглядов (или, по крайней мере, к необходимости их существенного дополнения), дают результаты последних десятилетий, свидетельствующие о необходимости предварительного численного моделирования процесса распространения акустических волн в исследуемом объекте, предназначенного для последующего оптимального расположения регистрирующих датчиков и подбора их характеристик.

Результаты численного моделирования

Линейная модель

Несмотря на очевидную ограниченность линейных моделей в описании реальных объектов привлекает их способность описать динамические явления, свойственные этим объектам, например, влияние граничных условий.

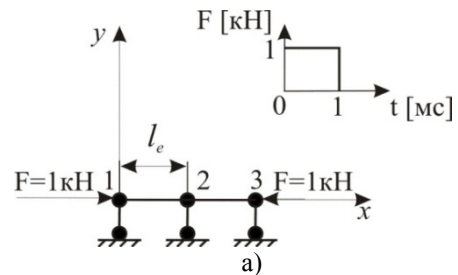
Рассматривается простая с геометрической точки зрения задача – стержень длиной 4 м. (рис. 1). Нижняя грань стержня, который моделируется балочными 2-х узловыми элементами типа TRUSS2D ($l_e = 2$ м), имеет ограничения по перемещениям вдоль оси y .

Нагрузка прикладывается в виде импульсов симметрично на концах стержня. Различный характер перемещений U_x наблюдается в узлах №1, 2, 3, представленные на рис. 1,б,в,г соответственно. В середине стержня произошло сложение колебаний и $U_x = 0$. На концах стержня, как и ожидалось, колебания происходят в противофазе.

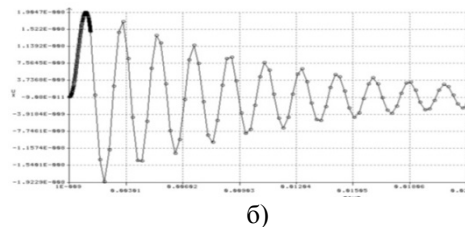
Плоская модель

Далее рассмотрим модель плоского тела, представленную на рис. 2 в различные моменты

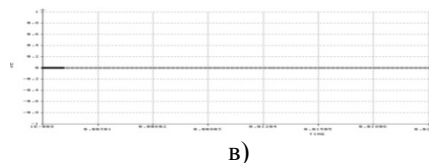
времени. По нижней границе введены ограничения по перемещениям, отсюда $U_y = 0$. Нагрузка приложена по обеим вертикальным граням в виде распределенной силы (10 Н в каждом узле). Форма импульса представлена на рисунке, его длительность составляет 10^{-3} с. Характерный размер SHELL3T-элементов составляет 3 см, что в ~ 200 раз меньше длины и согласуется с общепринятым ограничением по размерам элементов. Расчетный шаг по времени для этой модели Δt равнялся 100 мкс. Диаметр отверстия 5 см. Вблизи геометрического концентратора смоделирована более густая конечно-элементная сетка.



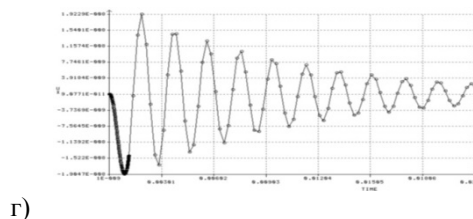
Узел №1



Узел №2



Узел №3



г)

Рис. 1. Модель 1

а – граничные условия для линейной модели, б – перемещение U_x в узле №1, в - перемещение U_x в узле №2, г - перемещение U_x в узле №3

На рисунке 2,а,б представлены напряжения σ_x в моменты времени 0,05 и 0,15 мс соответственно. Цвета автоматически масштабируются от минимума до максимума исследуемого параметра. Четко прослеживается фронт распространения волнового импульса. На рис 2,а волновой импульс от обеих граней доходит до четверти модели. По теоретическим подсчетам продольная волна идет с известной скоростью и доходит до четверти модели (0,25 м) за время равное 0,048 с (для моды, которая является самой быстрой). Таким образом, результаты численного расчета (рис. 2,а) совпадают с теоретическим.

На рис. 2,б акустические волны со стороны боковых граней проходят $\frac{3}{4}$ модели, огибают концентратор. В середине модели происходит сложение волн, вблизи отверстия наблюдается эффект концентрации напряжений. Коэффициент концентрации напряжений σ_x составляет ~ 3 , что удовлетворительно согласуется с теоретическим решением задачи Кирша.

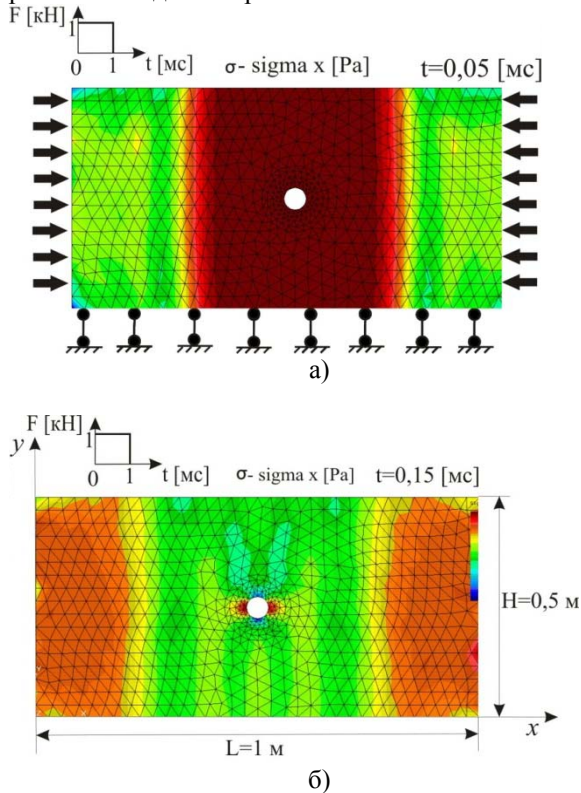


Рис. 2. Распространение волнового импульса в модели 2

а - изолинии σ_x через $t = 0,05$ мс после удара,
б - изолинии σ_x через $t = 0,15$ мс после удара

Далее рассматривалась пластина размерами 1×1 м с трещиновидным концентратором. Продвижение трещины в реальной модели представляет собой разрыв атомарных связей и освобождение квантиля энергии. В численной модели данный процесс был смоделирован приложением силы в узле модели в виде импульса F (рис. 3,а). Величина силы составила 1 кН,

длительность импульса 0,1 мс, данные величины максимально приближены к реальным значениям. Закрепление модели осуществлено по двум граням: на левой: запрет перемещений и поворотов (жесткая заделка), на нижней запрет перемещений по вертикальной оси. Расчетное время прихода акустической волны от источника до заделки составило $\sim 0,19$ с. Для различных моментов времени распространения волны на рис. 3,б,в представлены поля горизонтальных перемещений U_x

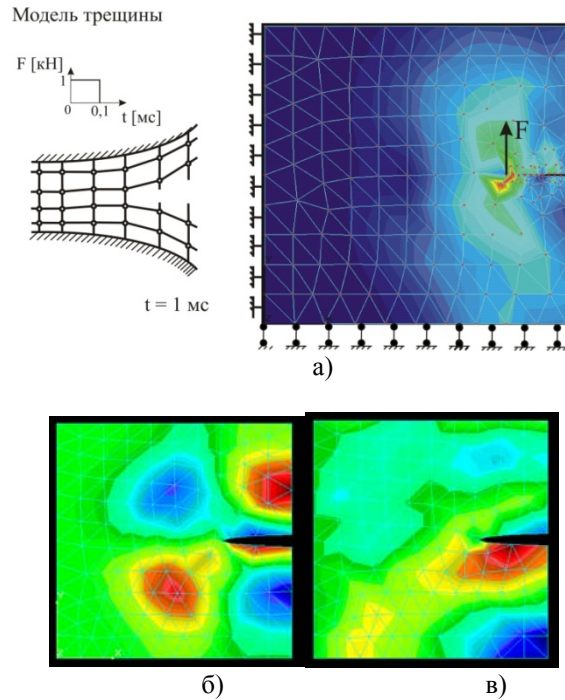


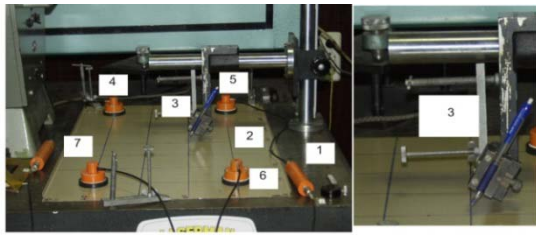
Рис.3. Пластина с трещиной

а – граничные условия,
б - изолинии U_x через $t = 0,1$ мс после удара,
в - изолинии U_x через $t = 1$ мс после удара.

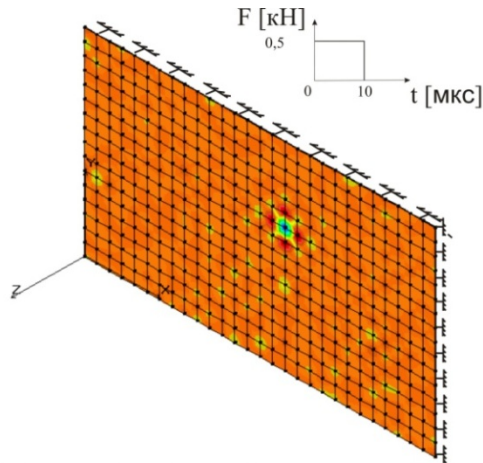
Результаты физического эксперимента

Экспериментальная схема была смонтирована на виброзащищенном столе ВИС-1 (рис. 4,а) массой ~ 1000 кг.

Исследуемая пластина 2 из материала Ст3 имела размеры 0,7 на 0,4 м. Источником излучения акустической волны был хрупкий излом грифеля 3 твердостью 2Т диаметром 0,3 мм, выдвинутый из цангового карандаша на 3 мм ($\pm 0,5$ мм). Такой излом (проба Су-Нильсена) генерирует интенсивный акустический сигнал, подобный натуральному сигналу акустической эмиссии. Датчики 4-7 чувствительны только к перемещениям U_z точек поверхности исследуемой пластины (по нормали к поверхности).



а)



б)

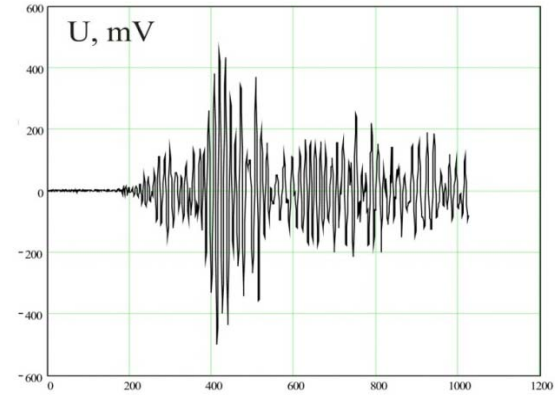
Рис. 4. Проба Су-Нильсена
а – экспериментальная установка:
1 – виброизолированная плита, 2 – исследуемая плита, 3 - грифель, 4,5,6,7 – датчики регистрации акустических сигналов.
б – конечноэлементная модель, изолинии U_z

В численном эксперименте требование для шага дискретизации по времени $1 \cdot 10^{-9} \text{ с} < \Delta t < 5 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ было удовлетворено, что обеспечило решение задачи распространения акустической волны в материале объекта.

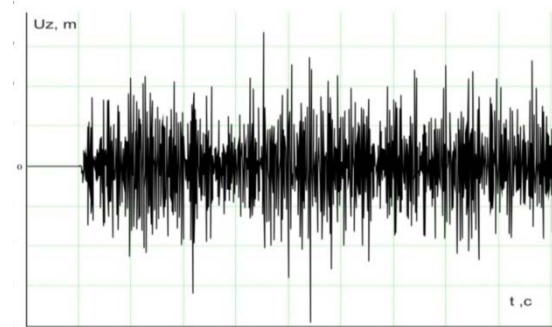
Конечноэлементная модель закреплена жестко по одной из плоскостей, что дает возможность анализировать только высокочастотный диапазон. Данный прием использован для того, что отсесть низкие частоты колебаний пластины. Как правило, системы обработки сигналов акустической эмиссии работают в частотном диапазоне от сотен кГц до десятков МГц. Это обеспечивается шириной АЧХ самих пьезоэлектрических преобразователей и частотной фильтрацией сигналов в системе непосредственно. Нагрузка приложена в узле с теми же координатами, что и имитатор Су-Нильсена в виде сосредоточенной силы (0,5 кН) длительностью импульса равной 10^{-7} с , что обеспечивает высокую частоту моделируемого сигнала. Характерный размер SHELL6T элементов по толщине пластины (что является ключевым при анализе) составляет 0,6 мм и согласуется с обычными требованиями по пространственной дискретизации.

На рисунке 5,а представлена форма электрического сигнала, регистрируемого датчиком №4 системы СЦАД-16.03, на рисунке

5,б – полученное численно перемещение U_z в узле с координатами, совпадающими с координатами датчика № 4. Сопоставление полученных результатов позволяет говорить о корректности численного моделирования акустических сигналов.



а)



б)

Рис. 5. Отклик датчика №4 (а) и результаты численного расчета (б)

Выводы

1. Численное моделирование дает возможность прогнозировать характер перемещений точек поверхности объекта контроля, и, в соответствии с этим, обосновывать места установки датчиков регистрации сигналов АЭ.

2. Полученные результаты согласуются с известными аналитическими и экспериментальными данными.

3. Такой подход повышает достоверность получаемой информации и упрощает контроль сложных с геометрической точки зрения объектов.

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАДИАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Чигорко А.А.

Томский политехнический университет

Институт неразрушающего контроля

г. Томск, Россия

E-mail: chigorko@gmail.com

Обоснована важность контроля электризации диэлектриков космического применения. Рассмотрены основные контролируемые параметры: темновая проводимость (объемное удельное сопротивление), поверхностный потенциал, разрядные характеристики, и методы их контроля при проведении наземных испытаний на радиационную электризацию.

В связи с переходом к негерметичным конструкциям космических аппаратов (КА) остро стоит проблема минимизации эффектов электризации диэлектрических материалов и конструкций.

КА, функционирующие на геостационарной орбите, подвергаются воздействию магнитосферной плазмы и электромагнитного излучения солнечного спектра, что приводит к накоплению на наружных поверхностях электрических зарядов, возникновению значительных разностей потенциалов (нередко достигающих нескольких десятков киловольт) как между аппаратом в целом и окружающей плазмой, так и между отдельными элементами КА (дифференциальная электризация).

Неоднородность покрытий наружных поверхностей КА, различие по условиям освещенности, вторично-эмиссионным свойствам материалов, условиям облучения частицами плазмы обуславливает различие уровней зарядки поверхности элементов и конструкций КА. Следствием дифференциальной электризации является возникновение радиационно-стимулированных электрических разрядов (ЭСР), которые нарушают функционирование жизненно важных систем КА, приводят к выходу их из строя, разрушению и деградации материалов, сокращают время активного существования КА на орбите.

Наиболее непосредственный эффект электростатических разрядов – прямое распространение больших переменных токов в электрические цепи или не прямое распространение переменных токов посредством электромагнитного проникновения излученных электромагнитных полей в системы КА (кабели и цепи). По оценкам отечественных и зарубежных экспертов до 50 % отказов и сбоев в работе бортовой аппаратуры, а также снижение ресурса обусловлены воздействием факторов электризации.

Для контроля электризации проводят наземные испытания диэлектрических материалов и конструкций на радиационную электризацию, в которых моделируется воздействие факторов космического пространства.

Для проведения испытаний на радиационную электризацию в Институте неразрушающего контроля Томского Политехнического университета построены испытательные стенды «Прогноз-1» и «Прогноз-2». Стенды оснащены современными средствами откачки, вакуумной аппаратурой, средствами измерения и управления.

Они позволяют проводить испытания диэлектриков в условиях глубокого вакуума (порядка 10^{-6} Торр), под воздействием электронного облучения.

Для космического аппарата длительное накопление электрического заряда является негативным фактором. То есть, если не будет обеспечен механизм утечки заряда, в конце концов, диэлектрик накопит заряд, достаточный для генерации разрядного импульса, опасного для аппаратуры космического спутника.

При оценке угрозы КА специалисты по надежности определяют скорость накопления в диэлектрике заряда из окружающей плазмы и пытаются уравновесить ее скоростью утечки заряда из изолятора. Считается, что плотность тока утечки пропорциональна отношению напряженности электрического поля в диэлектрике и его удельного объемного сопротивления.

При расчетах обычно пользуются значением объемного сопротивления диэлектрика, взятого из специальных справочников. Методы для определения объемного сопротивления установлены в государственных стандартах, например [1]. По мере того как изолятор накапливает заряд, электрическое поле на поверхности диэлектрика будет увеличиваться до тех пор, пока ток темновой проводимости не будет равен току накопления заряда или до тех пор, пока на изоляторе не произойдет электростатический разряд.

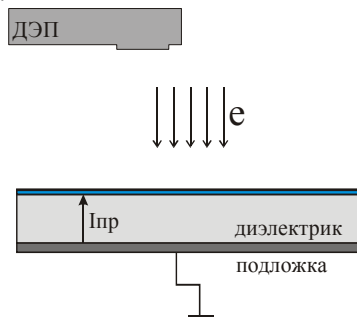
Таким образом, конструкция космического аппарата существенно зависит от значения удельного сопротивления материалов-изоляторов.

По-видимому, стандартные методы согласно [1] не применимы к условиям космического пространства. Испытания материалов по данному

стандарту проводятся на воздухе, электроды помещаются с обеих сторон диэлектрика и измерение тока проводимости проводятся всего лишь через несколько минут или часов после подачи напряжения смещения. Но на КА обычно изолятор только одной стороной контактирует с проводящей подложкой, к тому же, находится в вакууме и испытывает устойчивое напряжение смещения в течение года или более.

Применительно к задачам космоса необходимо использовать другие методы. В [2] А.Фредериксоном был предложен метод измерения удельного объемного сопротивления диэлектриков посредством измерения потенциала поверхности облученного диэлектрика.

Схема измерения представлена на следующем рисунке 1.



$I_{пр}$ - ток проводимости

Рис. 1. Схема измерения удельного объемного сопротивления

Измерения проводят в глубоком вакууме. Диэлектрический тонкопленочный материал располагают на заземленной металлической подложке. Поверхность диэлектрика облучается электронами с энергией порядка 10 кэВ. Затем облучение прекращается и в течение длительного времени (сутки и более) измеряется потенциал поверхности диэлектрика. Уменьшение потенциала связано с проводимостью образца. Допустим, что потенциал уменьшается по экспоненциальному закону с постоянной времени τ . Уменьшение потенциала связано с удельной объемной проводимостью ρ соотношением $\tau = \rho \epsilon = RC$, где ϵ – диэлектрическая проницаемость диэлектрика

Результаты данного метода измерения расходятся со справочными данными. Например, в справочниках приведены значения удельного сопротивления для полиимидов, основанные на стандартных методиках измерения, – от 10^{16} до 10^{18} Ом·см. Измеренное согласно данному методу удельное сопротивление образцов из каптона превысило $5 \cdot 10^{19}$ Ом·см, а других полиимидов – более чем $5 \cdot 10^{20}$ Ом·см [2].

Таким образом, для измерения удельного объемного сопротивления диэлектриков космического применения нельзя использовать стандартные методы измерения.

Радиационной электризации наиболее подвержены такие материалы, как ПММА (оргстекло), эпоксидная смола, керамические материалы, тефлон, каптон и др. Эти материалы имеют высокое удельное сопротивление и легко заряжаются. Поэтому в настоящее время эти материалы не используются в конструкции КА.

Другим негативным фактором электризации КА является накопление высокого поверхностного потенциала на диэлектрике. При прохождении теневых участков орбиты вследствие отсутствия фотоэмиссии разность потенциалов на КА может достигать 10-20 кВ.

Под термином «потенциал диэлектрической поверхности» понимается потенциал (относительно корпуса или других конструкций КА), который соответствует плотности заряда в приповерхностном слое диэлектрика. Высокий потенциал увеличивает вероятность возникновения разрядных процессов на диэлектрических поверхностях, и в зависимости от конфигурации, состояния и типа поверхности, может создавать пробивные напряженности.

Для измерения поверхностного потенциала при радиационных испытаниях диэлектриков применяется бесконтактный метод посредством регистрации электростатического поля, созданного заряженной поверхностью диэлектрика.

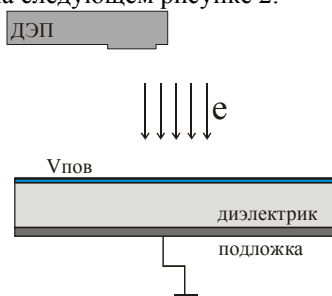
Для регистрации электростатического поля целесообразно использовать измерители напряженности электростатического поля, основанные на динамических методах регистрации. В данном измерителе один или несколько измерительных электродов перемещаются, в результате чего изменяется их потенциал. Это изменение потенциала электрода или тока, пропорциональные напряженности внешнего поля измеряются схемой регистрации. Динамические методы позволяют обеспечить длительные непрерывные измерения при достаточно невысоких значениях входного сопротивления схемы регистрации.

Из группы приборов, построенных на динамических принципах, можно выделить датчики вибрационного типа, в которых измерительный или экранирующий электроды совершают колебательное, возвратно-поступательное движение под действием электромагнитного возбудителя.

Датчики вибрационного типа могут длительное время работать в условиях вакуума при воздействии значительных перепадов температуры. Кроме того, они не создают значительные помехи в измерительной системе и не содержат деталей, подверженных деградации от электронного облучения.

В стендах «Прогноз» для измерения электростатического поля используются компактные датчики электростатического поля

(ДЭП) вибрационного типа. Схема измерения показана на следующем рисунке 2.



$V_{пов}$ - поверхностный потенциал

Рис. 2. Схема измерения напряженности электростатического поля

В ходе облучения диэлектрического образца, измеряют напряженность электростатического поля и, предварительно откалибровав ДЭП, рассчитывают потенциал поверхности диэлектрика.

Накопление заряда и увеличение поверхностного потенциала на диэлектрике в космических условиях могут привести к разрядно стимулированным электростатическим разрядам. Разрядные процессы в основном характеризуются амплитудой разрядного тока и длительностью импульса.

Электростатические разряды, протекающие на диэлектрических материалах, можно классифицировать следующим образом:

1) Пробой.

Классический пробой на металлическую подложку. При достижении пробивной напряженности внедренный в диэлектрик заряд стекает по разрядному каналу на металлическую подложку.

2) Флеш-овер.

Поверхностный разряд, который распространяется от начальной точки на поверхности диэлектрика. Проводимость поверхностного слоя диэлектрика многократно увеличивается, и разрядный ток замыкается на ближайшей «земле» (в большинстве случаев на металлизации диэлектрика).

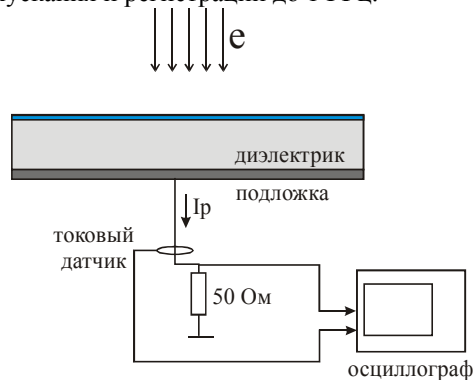
3) Блоу-офф.

Этот разряд связан с эмиссией электронов в пространство с заряженной диэлектрической поверхности. Электроны могут достигать заземленных конструкций далеко от места эмиссии.

Схема измерения разрядных токов приведена на следующем рисунке 3.

Сигнал с подложки может быть снят напрямую осциллографом через сопротивление 50 Ом, либо посредством кольцевого датчика тока (пояс Роговского или датчик Пирсона) с наносекундным разрешением и возможностью измерения импульсных токов до 100 А с шириной импульса порядка 50 нс-200 мкс [3].

Регистрируемый разрядный ток – это реальный ток и ток смещения, возникающий при развитии разряда «поверхность диэлектрика-плазма». Данный ток имеет высокочастотную составляющую. Длительность разрядного импульса варьируется в диапазоне от десятков наносекунд до сотен микросекунд, поэтому измерительная аппаратура для регистрации разрядных токов должна обеспечивать частоту пропускания и регистрации до 1 ГГц.



I_p - разрядный ток

Рис. 3. Схема измерения разрядных токов

Для визуального контроля и локализации разрядных процессов необходимо использовать высокоскоростная цифровая видеокамера с высокой световой чувствительностью.

Таким образом, контроль электризации диэлектрических материалов и изделий космического назначения очень важен. Для измерения параметров электризации не подходят обычные методы. Методы контроля должны учитывать специфику применения материалов. Необходимо проводить наземные испытания на радиационную электризацию при введении в конструкцию КА новых диэлектрических материалов и конструкционных изменений.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 6433.2-71 «Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения электрического сопротивления при постоянном напряжении»
- A. R. Frederickson, C. E. Benson. Measurement of charge storage and leakage in polyimides // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, Volume 208, p. 454-460
- А.А.Чигорко. Аппаратура для исследования электронно-протонного заряжения высокоомных диэлектриков условиях инверсного распределения потенциала // Известия ТПУ, Том 312, № 2, 2008. Математика и механика. Физика. Приложение. Труды международной научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика», с. 99-106

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОВОЛНОВЫМИ МЕТОДАМИ СТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Юрченко А.В., Юрченко В.И., Новиков А.Н., Китаева М.В.

Томский политехнический университет, Томск, пр. Ленина, 30, Россия.

E-mail: niipp@inbox.ru

Широкое применяются при производстве фотоэлектрических преобразователей многослойные структуры, аморфные и мультикристаллические материалы, в том числе нанопорошки. Исследование возможности контроля их электрофизических параметров посвящен настоящий доклад. При исследованиях использовались три типа датчиков, отличительной особенностью которых является квазистатическое пространственное разделение пучностей электрического и магнитного полей и локализация электрического поля в малом объеме: на основе запредельного отрезка волновода, коаксиального нерезонансного датчика и автодиного датчика. Для модельных экспериментов в качестве структурированных материалов использовались многослойные эпитаксиальные структуры арсенида галлия и фосфида индия, а также мультикремний и порошки кремния

Успехи в солнечной энергетике в значительной мере определяются наличием методов и средств контроля электрофизических параметров материала на всех этапах их производства. Современная технология солнечных батарей предъявляет следующие требования к методам измерения электрофизических параметров [4]: они должны быть бесконтактными, неразрушающими, обладать высокой локальностью, обеспечивать многопараметровый контроль, быть высокопроизводительными и иметь высокую точность. В настоящее время перечисленным требованиям в наибольшей степени удовлетворяют СВЧ методы, основанные на взаимодействии электромагнитных полей СВЧ - диапазона со свободными носителями заряда полупроводника [1]. В настоящее время широкое применение при производстве фотоэлектрических преобразователей находят структурно неоднородные материалы, в том числе многослойные эпитаксиальные структуры, имеющие вертикальную составляющую неоднородности, мультикремний, имеющий как правило горизонтальную составляющую неоднородности, а также порошки, имеющие геометрическую и электрофизическую составляющую неоднородности в трех координатах. Проблема локальной диагностики заключается в концентрации зондирующего поля в малом объеме исследуемого объекта. При этом должна сохраняться высокая чувствительности измерительного датчика, отличительной

особенностью которого является ярко выраженное пространственное разделение пучностей электрического и магнитного полей и локализация электрического поля в малом объеме [5].

Ниже мы проанализируем применения СВЧ метода на примере модельных эпитаксиальных структур типа $n_s^+ - n - n^+$ арсенида галлия и фосфида индия, мультикремния, а также порошков кремния. Внесение полупроводника в резонатор приводит к увеличению потерь энергии последнего и, как следствие этого, к снижению, прошедшей через резонатор мощности. На рис. 1 показано распределение СВЧ токов, протекающих по образцу в ИР. Токи I_1 протекают в слое толщиной, равной величине скин-слоя δ , на частоте измерения f :

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{10^9 \rho}{f}}, \text{ где } \rho - \text{удельное сопротивление.}$$

Согласно [3], сопротивление этого слоя R , можно записать в виде: $R = 10^{-5} \sqrt{10 f c} \ln \frac{1}{D} + c \frac{d - \delta}{1 - \delta^2/4}$

, где D – диаметр токового контакта в центре образца, который можно принять равным диаметру штыря; d – толщина образца; l – диаметр образца.

При $d = l$ и $\delta > d$ преобладающими должны быть «сквозные» токи I_2 , текущие от штыря к стенке резонатора. Тогда сопротивление потерь R_n , вносимых структурой типа $n_s^+ - n - n^+$ (имеющей неоднородность вдоль поля) будет определяться суммарным сопротивлением последовательно включенных отдельных слоев структуры (сопротивлением переходов $n - n^+$ можно пренебречь). Эквивалентную схему структуры при подобном допущении можно представить в виде рис. 1 б, где $C_1 R_1$ – емкость и сопротивление n^+ -слоя; $C_2 R_2$ – емкость и сопротивление n -слоя; $C_3 R_3$ – емкость и сопротивление n_s^+ -слоя. Полный импеданс такой структуры можно записать в виде

$$Z = \sum_{i=1}^3 \frac{R_i}{1 + j\omega R_i C_i} = \sum_{i=1}^3 \frac{R_i}{1 + (\omega R_i C_i)^2} - j \sum_{i=1}^3 \frac{\omega R_i^2 C_i}{1 + (\omega R_i C_i)^2}.$$

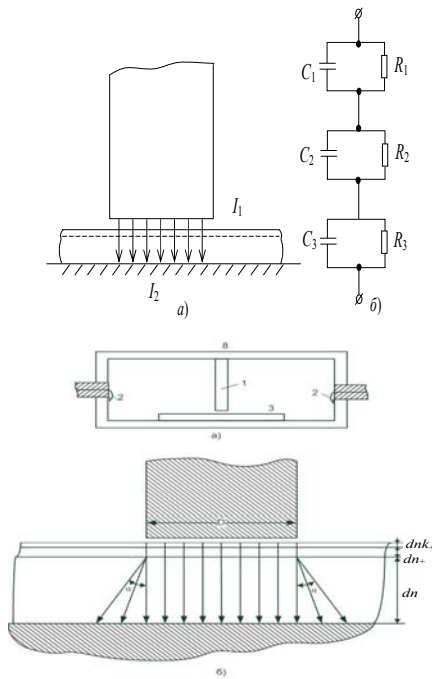


Рис. 1. Схема структуры в поле емкостного зазора ИР (а) и ее эквивалентная схема (б)

Для структуры, состоящей из трех слоев: низкоомной подложки n_S^+ толщиной 300 ± 20 мкм с концентрацией носителей заряда $n \geq 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, активного n -слоя толщиной $5-20$ мкм с $n = 5 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и верхнего высоколегированного контактного n^+ -слоя толщиной $3-5$ мкм $n \geq 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), диаметре штыря и частоте измерения ($f = 2$ ГГц) получаем $(\omega R_i C_i)^2 = 1$,

$$R_n = \text{Re} Z; \sum_{i=1}^3 R_i, \text{ где } R_i = \frac{\rho_i d_i}{S_k} - \text{сопротивление}$$

отдельного слоя; $S_k = \pi D^2 / 4$ – площадь токового контакта под штырем; ρ_i – удельное сопротивление отдельного слоя; d_i – толщина отдельного слоя. Так как для используемых структур сопротивление n -слоя $R_2 \gg R_1, R_3$, то $R_n \gg R_2 = \frac{\rho_2 d_2}{S_k}$ и, следовательно, основные потери в ИР будет вносить n -слой.

При неизменной величине СВЧ мощности на входе ИР изменение величины сигнала на его выходе определяется сопротивлением n -слоя.

Исследовано влияние параметров отдельных слоев структуры, геометрических размеров образцов, а именно толщины (рис.2а) и площади

(рис 2б) или края образца (рис 2г). При уменьшении геометрических размеров образца (расстояния от токового контакта до края) возрастает роль токов, текущих по поверхности образца I_1 . Таким образом, при $S \geq 6 \text{ мм}^2$ и $\Delta \geq 2,5 \text{ мм}$ получаем $I_1 \ll I_2$. При измерение «СВЧ ответа» структур с различными параметрами n -слоя была получена линейная зависимость величины «СВЧ ответа» от сопротивления n -слоя R_2 с площадью, равной площади токового контакта под штырем S_k и толщиной, равной толщине n -слоя (d_2) (рис. 3.). Удельное сопротивление n -слоя может быть найдено по формуле $\rho_2 = \frac{R_2 S_k}{d_2}$, где ρ_2 – удельное сопротивление n -слоя.

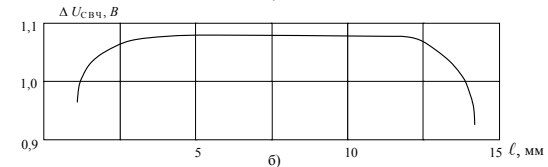
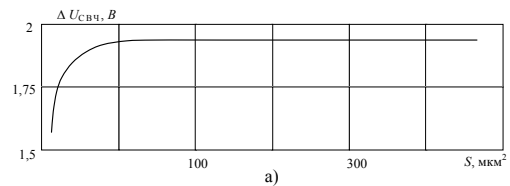
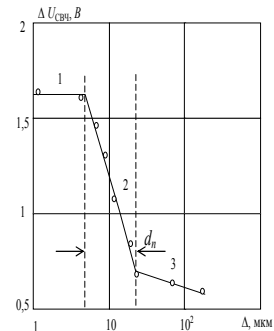


Рис. 2. Зависимость сигнала от толщины слоя (а) и от площади эпитаксиальной структуры (б)

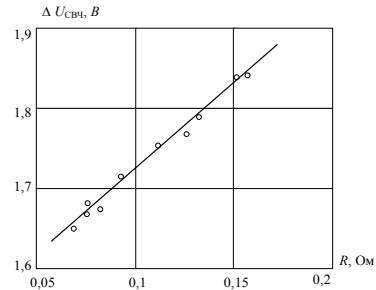


Рис. 3. Зависимость величины сигнала от сопротивления n -слоя

Проведенные эксперименты подтвердили правильность предложенной модели внесения

потерь в ИР многослойной полупроводниковой структуры типа $n_s^+ - n - n^+$ и показали возможность измерения удельного сопротивления n -слоя, «скрытого» за высоколегированными n^+ -слоями без учета влияния явления растекания тока в полупроводнике.

С учетом растекания тока сопротивление $n_k^+ -$ слоя и n -слоя запишутся в виде $R_{n_k^+} = \frac{4\rho_{n_k^+} d_{n_k^+}}{\pi D^2}$,

$R_n = \frac{4\rho_n d_n}{\pi D^2}$, где d_n, d_{n^+} – соответственно толщины контактного n -слоя и $n_k^+ -$ слоя; $\rho_n, \rho_{n_k^+}$ – соответственно удельные сопротивления n -слоя и n^+ -слоя.

Ранее были получены формулы для сопротивления растекания R по полупроводниковой пластине толщиной d с удельным сопротивлением ρ , имеющей на поверхности контакт в виде диска диаметром D [3]:

$$\frac{R_n}{R} = \frac{1}{1 + \frac{\rho_{n_s^+} D}{4\rho_n d_n} \arctg \frac{4d}{D}} \quad (2)$$

$$\frac{R_n}{R} = \frac{1}{1 + \frac{\rho_{n_s^+} d_{n_s^+}}{\rho_n d_n} \left(\frac{1}{1 + 2 \frac{d}{D} \operatorname{tg} \alpha} \right)} \quad (3)$$

При отсутствии растекания $\alpha \rightarrow 0$, $\frac{R_n}{R} \rightarrow 1$, и

основные потери в ИР будет вносить n -слой, как и было получено ранее. Для структур, у которых имеется растекание тока, отношение R_n/R будет зависеть не только от параметров отдельных слоев структуры, но и от отношения диаметра D контакта к толщине структуры d . Чем меньше диаметр торца штыря, тем значительнее вклад n -слоя в общие потери, вносимые в резонатор.

На рис. 4 приведены зависимости R_n/R (кривые 1, 4), полученные по формуле (3) и формуле (2) (кривые 2, 3, 5). Из этих кривых видно, что при записи сопротивления растекания в виде (3) для всех

структур с $\frac{\rho_{n_s^+}}{\rho_n} \leq 0,1$ вклад подложки и, соответственно, сопротивления мал и не превышает 10 %. Тогда как по формуле (3.9) растекание тока в

подложке вносит такой же вклад уже при $\frac{\rho_{n_s^+}}{\rho_n} \geq 0,003$.

Отношение D/d также влияет на чувствительность ИР. Для увеличения коэффициента включения K полупроводника в поле ИР, а следовательно, чувствительности ИР, необходимо, чтобы толщина структуры d была близка к величине зазора d_3 . При этом коэффициент включения K будет определяться отношением величины емкости зазора C_3 к общей емкости резонатора C , которая складывается из емкости зазора и боковой емкости штыря C_b [3]:

$$K = \frac{C_3}{C_3 + C_b} = \frac{D^2 / 16d_3}{D^2 / 16d_3 + \frac{D}{2\pi} \ln \frac{h}{d_3}},$$

где h – длина емкостного штыря.

Будем считать, что $d = d_3$. При уменьшении отношения D/d коэффициент включения K уменьшается (рис.4, сплошная линия), что уменьшает чувствительность ИР. Анализируя зависимость R_n/R и K от D/d можно сделать вывод, что измерять сопротивление n -слоя структуры $n_k^+ - n - n_s^+$ можно лишь при вполне определенном соотношении между диаметром торца штыря D и величиной зазора d_3 . При уменьшении величины D/d невозможно будет выделить потери, вносимые в ИР n -слоем, на фоне потерь, вносимых в ИР подложкой.

Для экспериментальной проверки изложенных выше положений были проведены измерения при различных диаметрах штыря и неизменном зазоре, равном 350 мкм. Толщина измеряемых структур ($d = 320 \pm 20$ мкм) была близка к величине зазора, удельное сопротивление n -слоя $\rho_n = 0,8 - 1,0$ Ом·см³, а толщина $d = 8 - 10$ мкм. Использовали штыри диаметром от 0,3 до 2,0 мм. Измерение коэффициента включения полупроводника в поле

ИР проводилось путем измерения отношения $\frac{\Delta f}{f}$

(разности резонансных частот $\Delta f = f - f_0$ резонатора с пленкой f и пустого f_0 к резонаторной частоте пустого резонатора) (рис. 4, пунктирная линия).

Исследование зависимости величины внесенных полупроводником в ИР потерь проводили по зависимости отношения U_n/U_0 величины сигнала СВЧ на выходе резонатора с полупроводником U_n к величине сигнала СВЧ U_0 на выходе пустого резонатора от D/d (рис.4б, пунктирная линия).

Теоретические и экспериментальные зависимости качественно совпадают (практически при любой аппроксимации R), что подтверждает правомерность изложенных выше положений и необходимость учета растекания СВЧ тока в исследуемой структуре при применении ИР с

емкостным штырем. Однако более точное количественное совпадение для используемых в

измерениях структур $\frac{\rho_{n_s^+}}{\rho_n} \geq 0,03$ получается при расчете по формуле (4.2) для сопротивления

растекания. Величина отношения $\frac{\rho_{n_s^+} d_{n_s^+}}{\rho_n d_n}$

определяет интервал значений d/D , для которых при заданной чувствительности ИР (коэффициенте включения) ошибка определения R_n/R из СВЧ измерений получается не более 20 %.

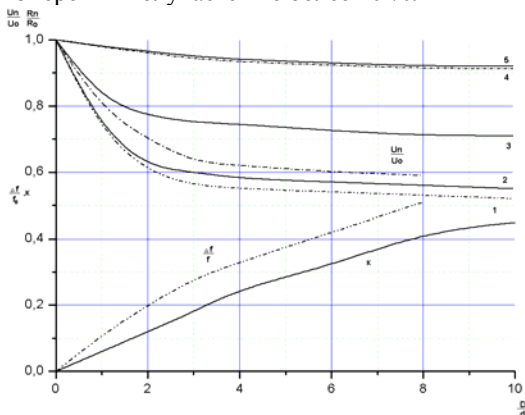


Рис. 4. Расчетные зависимости коэффициента включения K полупроводника в поле ИР и величины R_n/R от D/d и экспериментальные зависимости $\Delta f/f_0$

В экспериментах по СВЧ измерениям использовался измерительный резонатор (ИР), образованный отрезком запердельного волновода сечением 24×48 мм², нагруженного емкостным штырем диаметром 1 мм. Связь ИР с линией осуществлялась индуктивными петлями связи, введенными через узкие стенки волновода.

Анализ взаимосвязи между величиной СВЧ сигнала на выходе ИР со структурой фосфида индия показывает, что величина СВЧ сигнала растет с ростом концентрации вследствие меньшей величины вносимых потерь и имеет тот же характер, что и для пленок арсенида галлия. Причем для выделения вклада, вносимого подложкой, был проведен эксперимент по измерению СВЧ сигнала 6 подложек, на которых затем были выращены эпитаксиальные слои с различной концентрацией и измерен СВЧ сигнал. Установлено, что с ростом концентрации величина вносимых потерь уменьшается. Проведенные исследования показывают возможность измерения удельного сопротивления многослойных пленок фосфида индия СВЧ методом, причем общие закономерности имеют тот же характер, что и для пленок арсенида

галлия. Однако для получения количественных совпадений необходимо провести уточнение

градуировочной кривой $\rho_{\text{н\ddot{a}+}} = \frac{1}{2,56U + 2,7}$ на

основании измерения эталонных образцов фосфида индия с малыми величинами разброса электрофизических параметров по площади и толщине.

Выводы

Проведенные расчеты и полученные экспериментальные зависимости показывают необходимость учета явления растекания СВЧ – тока в полупроводнике при измерении удельного сопротивления структурно неоднородных материалов в датчиках квазистатического типа.

Проведено обоснование применимости СВЧ–метода измерения удельного сопротивления в структурно неоднородных материалах и разработаны технические решения, позволяющие проводить их измерения

Для увеличения коэффициента включения локального участка исследуемого слоя в поле чувствительного элемента датчика и повышения чувствительности метода в целом, необходимо, чтобы толщина измеряемого слоя d была близка к величине зазора d_3 чувствительного элемента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воторопин С.Д., Юрченко А.В., Юрченко В.И. и др. Автоматизированная установка на основе автодиных датчиков КВЧ диапазона для контроля материалов // Электронная промышленность. – 1998. – Вып. 1–2. – С.136–137.
2. Литвин С. В., Юрченко В.И. Исследование многослойных эпитаксиальных структур в проходном резонаторе. // Электронная техника. Сер. 2, Полупроводниковые приборы, – 1981. – Вып.7(150). – С. 2–6.
3. Литвин С.В., Юрченко В.И. Учет явления растекания тока при измерении удельного сопротивления многослойных эпитаксиальных структур в резонаторе квазистатического типа. // Изв. Вузов Радиоэлектроника. – 1988. – депонированная статья.
4. Юрченко А.В., Юрченко В.И. Физические основы метрологии полупроводниковых фотоматериалов и тестирование сложных соединений на основе арсенида галлия // Материалы 7-й Рос. конф. "Арсенид галлия GaAs-99"– Томск. (21–23 октября 1999 г.). – Томск, С.60–61.

КОНТРОЛЬ СООСНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ

Якимов Е.В., Гольдштейн А.Е., Алимов Д.В., Вахрушев Д.В.

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: shishkovka@mail.ru

Измерение несоосности

Качество и эффективность буровых работ, проводимых в различных производственных сферах, в большой мере зависят от качества используемого бурового оборудования и в том числе бурильных труб. Важное место в обширной номенклатуре бурильных труб занимают трубы бурильные стальные с приваренными замками (универсальные ТБСУ, облегченные ТБСО, тяжелой серии ТБСТ и другие). Конструктивно такие трубы состоят из трех элементов: тела трубы и двух замков – муфты и ниппеля, приваренных к телу трубы методом сварки трением.

Важной характеристикой сварных соединений бурильных труб в значительной мере определяющей трудоемкость и точность бурения, срок службы бурового оборудования является соосность приваренных замков и тела трубы. Различают параллельное и угловое отклонение от соосности (рис. 1). Согласно [1] параллельное отклонение от соосности не должно превышать 0,3 мм, а угловое отклонение – 0,1 мм на 100 мм.

В соответствии с [1] контроль соосности заключается в измерении при вращении трубы двумя индикаторами часового типа радиальных биений замковой части трубы относительно оси тела бурильной трубы в двух сечениях, первое из которых расположено вблизи сварного соединения, а второе – вблизи торца замковой части трубы. Параллельное a_1 , мм и угловое a_2 , мм/100мм отклонения от соосности определяются по формулам:

$$a_1 = \frac{\delta_1}{2}; \quad a_2 = \frac{(\delta_2 - \delta_1) \cdot 100}{2A}, \quad (1)$$

где δ_1 – биение в сечении 1, мм; δ_2 – биение в сечении 2, мм; A – расстояние между сечениями, мм.

Измеренные значения отклонений от соосности a_1 и a_2 сравниваются с их предельно допустимыми значениями.

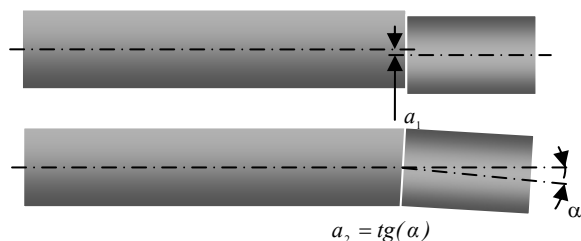


Рис. 1. Отклонение от соосности приваренных замков и тела трубы: a_1 – параллельное отклонение от соосности, a_2 – угловое отклонение от соосности

Система контроля соосности с индикаторами часового типа

В известных реализациях описанного метода контроля как измерительные, так и вычислительные операции, а также протоколирование результатов контроля осуществляются непосредственно самим контролером-оператором, что определяет высокий уровень влияния субъективного фактора на результаты контроля, его трудоемкость и низкую производительность. В целях устранения указанных недостатков на кафедре информационно-измерительной техники Томского политехнического университета разработана система контроля соосности СКС 10.02 [2], являющаяся рабочим средством контроля соосности приваренных замков бурильных труб в процессе их производства в соответствии с [1], а также в процессе их эксплуатации. В производственных условиях система контроля устанавливается на линии изготовления бурильных труб на участках сварки трением, температурного отпуска сварного соединения, технического контроля готовой продукции.

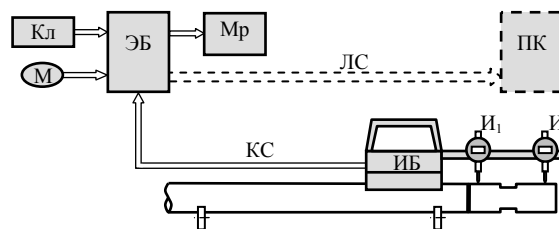


Рис. 2. Структурная схема системы контроля соосности СКС 10.02: ИБ – измерительный блок; И₁, И₂ – индикаторы часового типа; ЭБ – электронный блок; Кл – клавиатура; М – мышь; Мр – монитор; КС – кабель связи; ЛС – локальная сеть; ПК – персональный компьютер диспетчера

Основными функциями системы контроля являются:

- измерение значений параллельного и углового отклонений от соосности сварного соединения;
- сравнение измеренных значений отклонений с предельно допустимыми;
- индикация результатов измерения и контроля;
- хранение результатов контроля и их передача на рабочее место диспетчера через информационную сеть цеха.

На индикаторную панель системы выводится следующая информация:

- номера контролируемой трубы и ее сварного соединения;

- порядковый номер измерения отклонений от соосности для данного сварного соединения (при многократных измерениях);
- дата и время измерения;
- наружный диаметр трубы, мм;
- значение базового расстояния, используемого при измерении угловой несоосности, мм;
- предельно допустимое значение параллельного отклонения от соосности, мм;
- предельно допустимое значение углового отклонения от соосности, мм/100 мм;
- результат измерения значения параллельного отклонения от соосности сварного соединения, мм;
- результат измерения значения углового отклонения от соосности сварного соединения, мм/100 мм;
- результат контроля (годен/брак);
- преобразованные в аналоговую форму показания индикатора угловых отклонений от соосности (для определения азимута оси максимальных радиальных биений).

Все результаты контроля передаются через информационную сеть цеха на персональный компьютер рабочего места диспетчера, а, кроме того, результаты контроля сохраняются в памяти электронного блока.

Структурная схема системы контроля приведена на рис. 2. Система контроля содержит два основных блока: измерительный блок (ИБ) и электронный блок (ЭБ) с подключенными к нему периферийными устройствами – монитором (Мр), клавиатурой (Кл) и мышью (М). Измерительный и электронный блоки соединены между собой кабелем связи (КС).

Измерение отклонений от соосности осуществляется следующим образом. Цикл измерения запускается автоматически при установке измерительного блока на контролируемую бурильную трубу в месте стыка тела трубы и ее замковой части. В процессе измерения осуществляется вращение трубы на ножевых вращающихся опорах. Измерительный блок при вращении трубы удерживается на месте, но остается в постоянном контакте с поверхностью тела трубы через опорные подшипники и с поверхностью замковой части трубы через измерительные стержни двух индикаторов часового типа I_1 и I_2 . Показание (выходной сигнал) индикатора x определяется в этом случае суммой начального показания x_0 (до начала вращения трубы) и приращения Δx , обусловленного перемещением измерительного стержня индикатора вследствие возможной несоосности замковой части трубы относительно оси тела трубы:

$$x_1 = x_{01} + \Delta x_1; \quad x_2 = x_{02} + \Delta x_2, \quad (2)$$

где x_1 и x_2 , x_{01} и x_{02} , Δx_1 и Δx_2 – текущие, начальные показания и приращения показаний соответственно первого и второго индикаторов.

Для обеспечения максимальной достоверности результатов контроля сечение трубы, в котором производятся измерения первым индикатором, должно быть максимально приближено к плоскости сварного шва, а сечение трубы, в котором производятся измерения вторым индикатором, максимально приближено к торцу замковой части трубы.

Выходные сигналы индикаторов x_1 и x_2 преобразуются контроллером измерительного блока в форму, пригодную для передачи по интерфейсу RS-232, и передаются через кабель связи КС на вход электронного блока ЭБ.

В электронном блоке, основой которого является персональный компьютер с периферийными устройствами, осуществляется запись массивов значений сигналов x_1 и x_2 , соответствующих различным углам поворота контролируемой трубы в диапазоне от 0° до 360° , и определение минимальных $x_{1\min}$ и $x_{2\min}$ и максимальных $x_{1\max}$ и $x_{2\max}$ значений сигналов из этих массивов.

Значения радиальных биений в первом и втором сечениях замковой части трубы δ_1 и δ_2 определяются следующим образом:

$$\delta_1 = x_{1\max} - x_{1\min}; \quad \delta_2 = x_{2\max} - x_{2\min} \quad (3)$$

Далее производится вычисление значений параллельного a_1 и углового a_2 , отклонений от соосности по формулам (1) и сравнение полученных значений с предельно допустимыми.

В процессе контроля вычисляются значения приращения показаний первого и второго индикаторов Δx_1 и Δx_2 , которые в реальном времени отображаются в аналоговой форме на индикаторной панели системы.

Результаты контроля заносятся в электронный протокол контроля, выводятся на индикаторную панель, а также передаются по локальной сети ЛС на персональный компьютер диспетчера.

Основными элементами конструкции измерительного блока (рис. 3) являются основание, устанавливаемое при проведении контроля на тело трубы, штанга с закрепленными на ней цифровыми индикаторами часового типа и корпус, в котором размещена плата микроконтроллера, осуществляющего преобразование выходных сигналов индикаторов для передачи по интерфейсу RS-232 в электронный блок. Для облегчения движения основания по телу трубы используются шарикоподшипники.

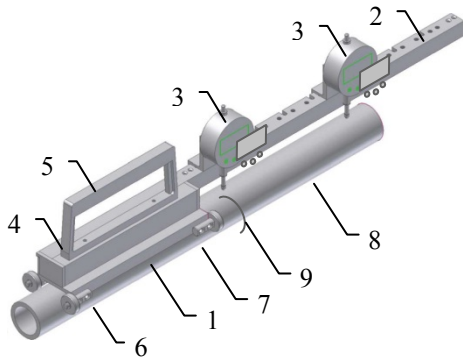


Рис. 3. Конструкция измерительного блока: 1 – основание; 2 – штанга; 3 – индикаторы; 4 – корпус; 5 – ручка; 6 – подшипники; 7 – тело трубы; 8 – приваренный замок; 9 – сварной шов

Для обработки сигналов измерительной информации, ее хранения и визуализации, осуществляемых в электронном блоке, разработана специальная программа. На рис. 4 показана лицевая панель программы с пользовательским интерфейсом оператора.

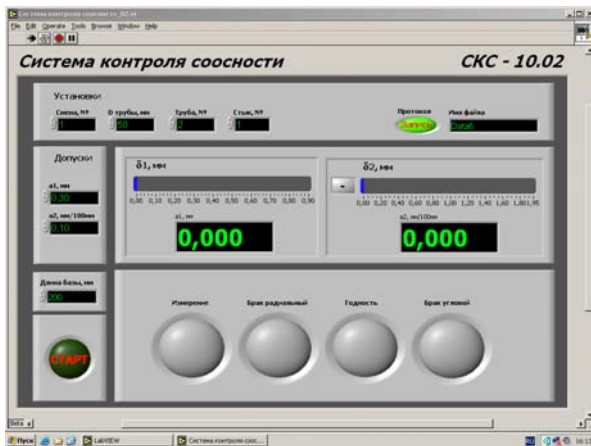


Рис. 4. Интерфейс оператора системы контроля соосности

Ниже приводятся основные технические характеристики системы контроля СКС 10.02

- наружный диаметр свариваемых заготовок – от 43 мм до 108 мм
- диапазон измеряемых значений параллельного отклонения от соосности – 0...2 мм;
- диапазон измеряемых значений углового отклонения от соосности – 0...10 мм/м;
- максимальная база измерения углового отклонения от соосности – 350 мм;
- допустимая погрешность измерения параллельного отклонения от соосности ± 0.05 мм;
- допустимая погрешность измерения углового отклонения от соосности ± 0.25 мм/м

В 2009 году разработанная система контроля соосности СКС 10.02 была установлена в трубном цехе ОАО «Завод бурового оборудования» (г. Оренбург).

Двухлетний период успешной эксплуатации системы контроля подтвердил ее высокие технические характеристики, однако выявил и необходимость дальнейшей модернизации системы с целью повышения надежности и удобства проведения операций контроля.

Основными направлениями модернизации системы контроля являлись замена кабеля связи измерительного и электронного блоков системы контроля на беспроводный интерфейс (радиоканал), а также замена контактных преобразователей биений трубы (цифровых индикаторов часового типа) на бесконтактные магнитные взаимоиндуктивные измерительные преобразователи.

Система контроля соосности с беспроводным интерфейсом

Организация подключения измерительного блока к электронному блоку через беспроводный интерфейс (Bluetooth, радиоканал и др.), отсутствие соединительного кабеля, повышает удобство эксплуатации системы на рабочем месте и надежность системы.

Выбор технологии беспроводной связи был сделан в пользу спецификации BlueTooth. Использование BlueTooth позволяет избавиться от разработки устройства сопряжения на стороне ПК, т.к. в настоящее время такое устройство можно приобрести, оно достаточно распространено и дешево. Так же готовые модули беспроводной связи BlueTooth имеют аппаратную реализацию защиты от помех, малое потребление, большой набор программных средств и документации для разработки программного обеспечения, как на ПК, так и на стороне связываемого с ним устройства.

В качестве BlueTooth модуля был выбран модуль WT12, который имеет встроенный контроллер, позволяющий произвести настройку модуля один раз и пользоваться им в запрограммированном «Профиле» (режиме). В системе контроля модуль BlueTooth программируется для использования его в режиме Serial Port Profile (SPP) – эмулирует последовательный порт, предоставляя возможность замены стандартного RS-232 беспроводным соединением. Радиус действия используемого модуля составляет 15–20 м.

Система контроля соосности с бесконтактными преобразователями

Существенным направлением модернизации является отказ от контактных методов контроля (с использованием цифровых индикаторов часового типа) в пользу бесконтактных методов. В этом случае повышается надежность системы, поскольку отсутствует контакт измерительного штока индикатора и трубы, а также становится шире диапазон рабочих температур.

В качестве бесконтактных преобразователей биений трубы в электрический сигнал были выбраны взаимоиндуктивные измерительные

преобразователи. На рис. 5 схематично показана конструкция используемого взаимоиндуктивного преобразователя.

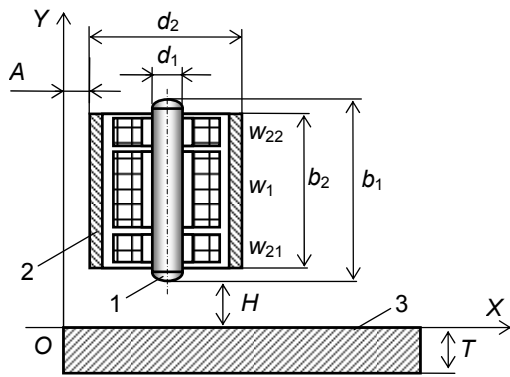


Рис. 5. Конструкция взаимоиндуктивного преобразователя

Составными элементами взаимоиндуктивного преобразователя являются обмотка возбуждения w_1 , измерительная обмотка с двумя встречно включенными секциями w_{21} и w_{22} , а также ферромагнитный сердечник 1 и ферромагнитный цилиндрический экран 2, образующие магнитную цепь преобразователя. Практически неиспользуемый в аналогичных по назначению и конструкции преобразователях магнитных толщиномеров цилиндрический экран необходим в данном случае для исключения влияния находящихся в окружении преобразователя металлических деталей (например, элементов крепления).

В отсутствие вблизи преобразователя ферромагнитных объектов выходное напряжение измерительной обмотки равно нулю, что обусловлено равенством по модулю потокоцепления магнитного поля обмотки возбуждения и встречно включенных секций измерительной обмотки.

При наличии вблизи торцевой части преобразователя ферромагнитного объекта 3 происходит перераспределение магнитных потоков через секции измерительной обмотки, что приводит к появлению напряжения разбаланса (вносимого напряжения) U_2 измерительной обмотки. Это напряжение функционально связано с расстоянием H до поверхности объекта нелинейной функцией преобразования $U_2(H)$. Степень нелинейности функции преобразования определяется конструктивными параметрами преобразователя.

Другим фактором, влияющим на значение напряжения U_2 , является расстояние A до края ферромагнитного объекта (рис. 5). Существенное влияние данного фактора при использовании предлагаемого преобразователя для контроля соосности обусловлено конструктивными особенностями замковой части бурильной трубы, заключающимися в относительно малом

расстоянии от торца замка до прорезей под ключ и, следовательно, в необходимости проведения контроля в условиях потенциально возможного проявления краевого эффекта.

В соответствии с вышесказанным, основными критериями при выборе конструктивных параметров взаимоиндуктивного преобразователя – длины и диаметра сердечника b_1 и d_1 , длины и диаметра экрана b_2 и d_2 , диаметра среднего витка обмоток d_0 , являлись степень нелинейности функции преобразования $U_2(H)$ и степень влияния на результат преобразования расстояния преобразователя до края объекта.

Для анализа влияния на функцию преобразования основных факторов был использован пакет моделирования COMSOL Multiphysics, позволяющий решать задачи, в том числе, из области электромагнетизма путем численного решения уравнений в частных производных методом конечных элементов. Построенная трехмерная модель преобразователя позволила осуществить анализ влияния на его функцию преобразования, как основных конструктивных параметров, так и оценить влияние на результаты преобразования краевого эффекта.

В качестве примера на рис. 6 показана рассчитанная с помощью COMSOL топография магнитного поля преобразователя при взаимодействии с плоским объектом при удалении от края объекта и вблизи края.

На рис. 7 приведены результаты моделирования влияния на функцию преобразования цилиндрического экрана. Здесь представлены зависимости вносимого объектом относительного изменения выходного напряжения ΔU_2^* (нормированного по значению начального напряжения одной секции измерительной обмотки) от расстояния H до поверхности объекта при отсутствии экрана (кривая 1) и при наличии экрана (кривая 2). Для второго случая построена также экспериментальная зависимость (кривая 3). Анализ этих результатов показывает, что наличие экрана приводит к некоторому увеличению степени нелинейности функции преобразования, но это увеличение может быть минимизировано уменьшением длины экрана по сравнению с длиной сердечника на $(15 \div 20)\%$.

Результаты математического и физического моделирования отличаются незначительно. Некоторое их расхождение обусловлено недостаточно качественной стабилизацией при эксперименте тока возбуждения.

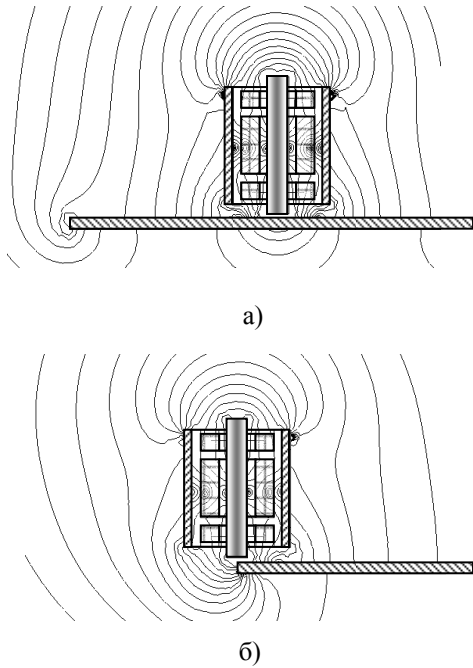


Рис. 6. Линии одинаковой индукции магнитного поля взаимноиндуктивного преобразователя при взаимодействии с плоским объектом при удалении от края объекта (а) и вблизи края (б)

На рис. 7 приведены результаты моделирования краевого эффекта. Здесь представлены зависимости относительного вносимого напряжения ΔU_2^* от расстояния A до поверхности объекта при отсутствии экрана (кривая 1) и при наличии экрана (кривая 2). Анализ этих результатов показывает, что для используемой конструкции преобразователя краевой эффект проявляется незначительно даже при установке преобразователя на самый край объекта. Влияние экрана на характер зависимости ΔU_2^* незначительно.

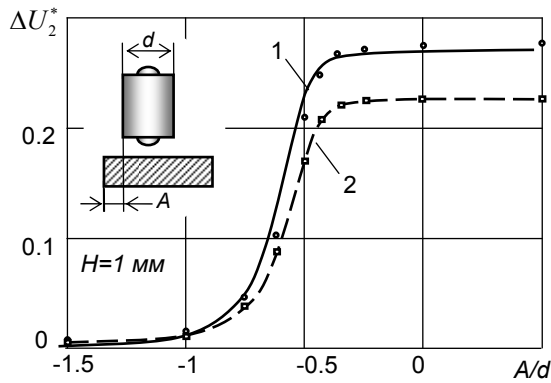


Рис. 7. Зависимость относительного вносимого напряжения преобразователя от расстояния до края объекта

Анализ других полученных математическим моделированием результатов показал, что оптимальные соотношения конструктивных параметров преобразователя следующие:

$$\begin{aligned} b_1 &= (1,5 \div 2,5)d_0; & d_1 &= (0,3 \div 0,4)d_0; \\ b_2 &= (0,75 \div 0,85)b_1; & d_2 &= (1,8 \div 2)d_0. \end{aligned} \quad (4)$$

Заключение

В настоящий момент на кафедре информационно-измерительной техники Томского политехнического университета получены положительные результаты по всем перечисленным направлениям модернизации, и могут быть предложены различные варианты систем контроля соосности приваренных замков буровых труб:

- система контроля соосности на основе цифровых индикаторов часового типа с кабелем связи (СКС 10.02);
- система контроля соосности на основе цифровых индикаторов часового типа с беспроводным интерфейсом;
- бесконтактная система контроля соосности с кабелем связи;
- бесконтактная система контроля соосности с беспроводным интерфейсом.

Имеющиеся технические решения могут быть использованы для измерения отклонения от прямолинейности трубы, поскольку при этом используется такой же принцип измерения биения тела трубы относительно мерной базы.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 51245-99 "Трубы буровые стальные универсальные. Общие технические условия"
2. Гольдштейн А.Е., Якимов Е.В. Измерение отклонения от соосности сварных соединений буровых труб. // Ползуновский вестник, 2010, № 2, с. 65-69.

РЕАЛИЗАЦИЯ МОДИФИКАЦИИ SAFT-АЛГОРИТМА ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Носков Н.Н., Шестаков В.В.

Научный руководитель: Капранов Б.И., д.т.н., профессор

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30

E-mail: noskov.nikolay@mail.ru

В статье рассмотрен проект реализации метода синтетической фокусировки апертуры для проведения ультразвукового контроля. Для этого предложена модификация SAFT-алгоритма, в которой фокусировка осуществляется довольно простым способом с учетом только смещения сигнала во времени и затухания ультразвука в среде. Так же для реализации системы определяющей пространственное положение УЗ преобразователя предложена система на основе оптического сенсора. Для реализации данного проекта используется универсальный ультразвуковой акустический тракт "ТРАК", вычислительные средства (ПК) и программная среда разработки Borland Delphi.

Введение

Ультразвуковой (УЗ) неразрушающий контроль (НК) является одним из наиболее надежных и достоверных методов определения сплошностей звукопроводящих материалов. На сегодняшний день существует множество методов для проведения ультразвукового контроля.

Наиболее чувствительное акустико-оптическое изображение основывается на точечном пьезоэлектрическом сканировании изображаемого распределения звукового давления и последующем электронном формировании изображения [1].

После обнаружения дефекта материала и его местонахождения важнейшей задачей контроля является определение его величины. Ее можно определить, например, по изображению, аналогичному рентгеновскому снимку. Акустическим методом изображения (визуализации), как и рентгеновский метод, ставит своей целью получение оптического изображения структур, которые непосредственно не являются видимыми. Для этого используется взаимодействие структур со звуковыми волнами, например отражение и поглощение: распределение звукового давления, испытавшее влияние интересующей нас структуры, при помощи большого числа акустико-оптических преобразователей превращается в оптическое изображение [2].

Уровень развития вычислительных систем позволяет реализовывать сложные алгоритмы когерентной обработки большого количества данных в режиме off-line с последующей обработкой графической интерпретации результатов контроля. С ростом производительности микропроцессорных средств появляется возможность, при использовании

простых моделей преобразователей, получать изрядное количество информации о состоянии внутренних структур контролируемого объекта. Так, например, в данной работе предлагается использование простого вертикального совмещенного преобразователя типа П111 совместно с линзой-насадкой для рассеивания или собирания УЗ пучка.

Так же возрастание качества электронных оптических датчиков позволяет применять последние для работы с поверхностями, качество которых раньше считалось непригодным для применения таких систем.

Математическая модель SAFT-преобразования

Контролируемый объект сканируется искателем с широко раскрытым звуковым пучком (например, с траекторией перемещения в форме меандра). Высокочастотные эхо-импульсы преобразуются в цифровую форму и запоминаются в виде трехмерного массива из значений амплитуд полученных сигналов $A(x, y, z)$. Для подобного сканирования необходимо организовать координатную привязку сканирующего луча [2].

После окончания сканирования цифровые эхо-импульсы перерабатываются следующим образом (формула 1). Объем контролируемого изделия разбивается при помощи ЭВМ на элементарные объемы $P_m(x_i, y_j, z_k)$ (Voxels). Затем один элементарный объем за другим рассматривается как местонахождение отражателя. Т.е. эхо-импульсы, измеренные при различных положениях искателя, корректируются различным сдвигом фаз $\Delta\phi$ в зависимости от неодинакового расстояния до кубика, рассматриваемого в данный момент, и накладываются один на другой, т.е. проводится преобразование массива акустического изображения $A(x, y, z)$ в массив значений отражательных способностей элементов объема $P(x_i, y_j, z_k)$:

$$\sum_{i=0}^n A_i(x, y, z) \rightarrow P(x_i, y_j, z_k) \quad (1)$$

Таким путем можно получить большие результирующие эхо-импульсы только для истинных мест нахождения отражателя вследствие усиливающей интерференции, а в других местах вследствие разрушающей (гасящей) интерференции этого не будет наблюдаться. В результате будет установлено соответствие определенного значения амплитуды для каждого кубика. Отсюда конструируется изображение.

Объем контролируемого изделия изображается в трех измерениях. Процесс сканирования и вычислений имитирует при усиливающей интерференции преобразователь такого же размера, как и площадь сканирования с фокусирующей линзой, соответствующей глубине положения отражателя. Следовательно, апертура преобразователя (она пропорциональна его диаметру) и линза синтезируются самим процессом сканирования; отсюда и взято название — техника синтетической фокусировки апертуры (SAFT).

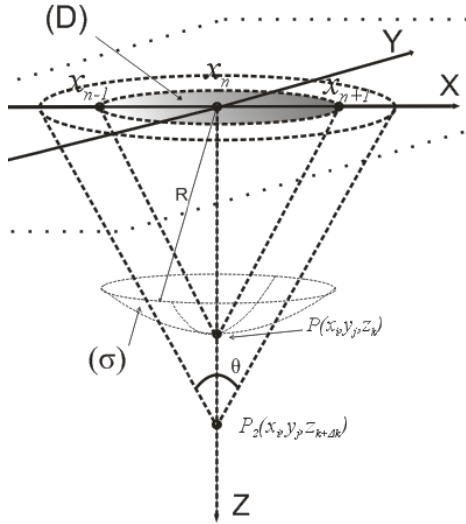


Рис.1. Принцип предлагаемой реализации

Разрешающая способность соответствует длине волны примененного ультразвука. Благодаря усреднению сигнала достигается большое отношение сигнал — шум. Недостатком является большое время вычислений, а так же продолжительность сканирования.

Фактически алгоритм работает с дискретными элементами пространства, однако обрисовки математической модели преобразования приведу интегральную форму преобразования массивов. Процесс «свертки» (формула 2) области акустического изображения в элемент $P(x_i, y_j, z_k)$ (Рисунок 1), представляющий собой значение относительной отражательной способности воксела заключается в интегрировании значений $A(x, y, z)$, принадлежащих поверхности (σ) :
$$P(x_i, y_j, z_k) = \iint_{(\sigma)} A(x, y, z) d\sigma = \iint_{(D)} A_1(x, y, z_k - \Delta\varphi(x, y) dx dy, \text{ где} \quad (2)$$

$$(D): \left\{ (x - x_i)^2 + (y - y_j)^2 \leq (z_k \cdot \operatorname{tg}(\frac{\theta}{2}))^2 \right\} \quad (3)$$

Область интегрирования (D) изменяется в зависимости от глубины залегания z_k условного отражателя, зависимость отражена в формуле 3. Так же из рисунка 1 легко можно определить корректирующий сдвиг фаз $\Delta\varphi$ (формула 4) в зависимости от различного расстояния до отражателя:

$$\Delta\varphi(x, y) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_j)^2 + z_k^2} - z_k \quad (4)$$

Более полно формула SAFT-преобразования будет выглядеть, с учетом затухания ультразвука в среде, следующим образом:

$$P(x_i, y_j, z_k) = \left[\iint_{(D)} A_1(x, y, z_k - x - xi^2 + y - yj^2 + zk^2 dx dy \right] e^{-\delta \cdot z_k} \quad (5)$$

Формула 5 является основной рабочей формулой для реализации данной работы. Для программной реализации данной математической модели понадобится дискретная форма этого выражения.

Рассмотрим некоторые варианты расположения дефектов, которые являются проблематичными для обнаружения при работе, например, с прямым совмещенным преобразователем:

- Дефекты расположены друг под другом, как на рисунке 1. Точки P и P_2 являются маленькими одинаково отражающими во все стороны дефектами. В этом случае при нахождении ПЭПа над дефектом, отражатель, находящийся глубже, не индицируется на диаграмме, однако при наложении сигналов, результирующий сигнал достаточно четко определяет локацию дефекта.

На рисунке 2 представлены эхо-импульсы с различных положений преобразователя (для простоты изображено только три точки и только по одной оси).

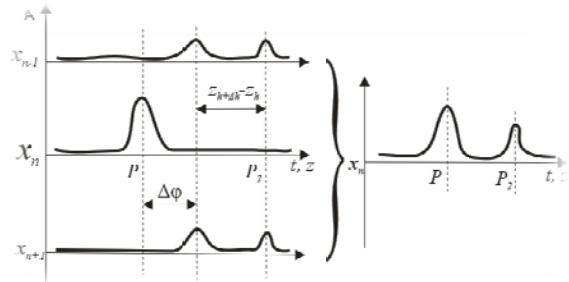


Рис.2. Эхо-импульсы от дефектов расположенных друг под другом

Естественно существует предельно расстояние между отражателями при котором они перестают различаться. Это расстояние определяется в основном углом раскрытия звукового поля искателя θ .

- Ситуация такая же как и в первом случае только нижний дефект представляе собой протяженную трещину ориентированную вдольнаправления УЗ импульса из точки x_{n+1} (Рисунок3).

Большой сложностью для реализации данного алгоритма является отсутствие преобразователя с широкой диаграммой направленности. Решением может послужить применение рассеивающих линз, либо работа на больших глубинах в дальней зоне [3]. Так же проблемно отсутствие четкой аппаратно реализованной координатной привязки. Реализация одного из вариантов подобного

устройства на основе оптического преобразователя будет рассмотрена далее.

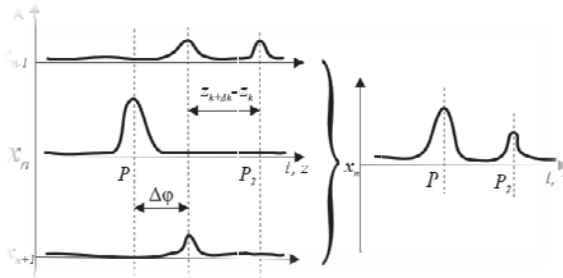


Рис.3. Эхо-импульсы от дефектов расположенных друг под другом. Один из дефектов- трещина ориентированная вдоль УЗ луча из одной из позиций преобразователя

Формирование (рассеивание) акустического поля

Для информативной реализации метода SAFT необходимо наличие широко раскрытого акустического поля. Производители серийно не выпускают преобразователи с широкой диаграммой направленности. Было принято решение использовать рассеивающие (собирающие) линзы насадки и преобразователь типа П111:

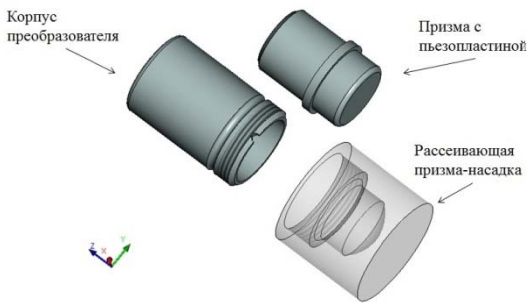


Рис. 4. Устройство преобразователя с широкой диаграммой направленности

Так же были рассчитаны геометрические параметры призм-насадок для угла раскрытия УЗ пучка в 60° для различных контролируемых материалов. На рис.5, 6 изображено два варианта линзы для контроля стали. Вариант 1 (рис. 5) можно применять для контроля на небольших глубинах, 2 (рис. 6)- для более больших глубин контроля.

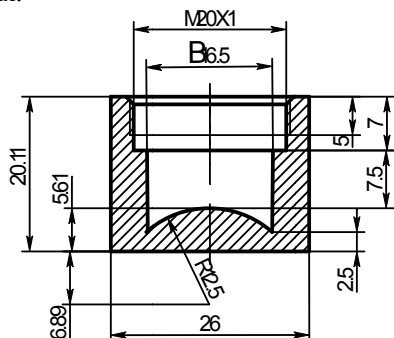


Рис. 5. Призма-насадка рассеивающая

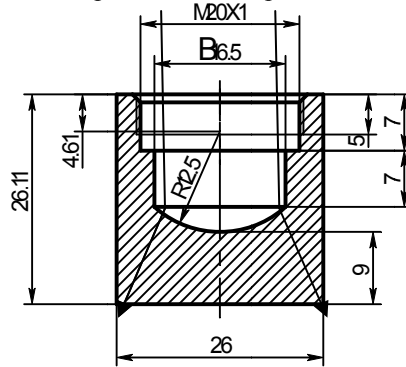


Рис. 6. Призма-насадка собирающая

Это решение поставленной задачи не является оптимальным, это наиболее легко осуществимая модификация преобразователя. Для дальнейших исследований необходимо разработать оптимальную модель преобразователя для контроля SAFT-методом.

Определение положения (координаты) преобразователя

Для построения томографического изображения (секущая поверхность или объемная модель) требуется координатная привязка УЗ преобразователя. Существуют образцы, основанные на применении механических сканеров, а также аппаратура, представляющая собой приставки к обычным дефектоскопам и предполагающая одновременное использование двух или более электронных блоков, так же системы акустической локации [5].

В данной статье рассматривается возможность создания подобной системы на основе сенсора, применяемого в оптических компьютерных мышках. А именно применение сенсоров с маркировками ADNS-3060 и ADNS-2610. Само устройство представляет собой сенсор соразмерный с УЗ преобразователем, прикрепляемый к последнему. Обмен данными о перемещении с вычислительным блоком осуществляется через USB интерфейс, где при помощи программного модуля, разработанного для реализации SAFT-алгоритма, приводится в соответствие данных с положением УЗ преобразователя на сканируемой поверхности.

С помощью светодиода, и системы фокусирующих его свет линз, под мышью подсвечивается участок поверхности. Отраженный от этой поверхности свет, в свою очередь, собирается другой линзой и попадает на приемный сенсор микросхемы — процессора обработки изображений. Этот чип, в свою очередь, делает снимки поверхности под мышью с высокой частотой (кГц). Причем микросхема (назовем ее оптический сенсор) не только делает снимки, но сама же их и обрабатывает, так как содержит две ключевых части: систему получения изображения Image Acquisition System (IAS) и

интегрированный DSP процессор обработки снимков.

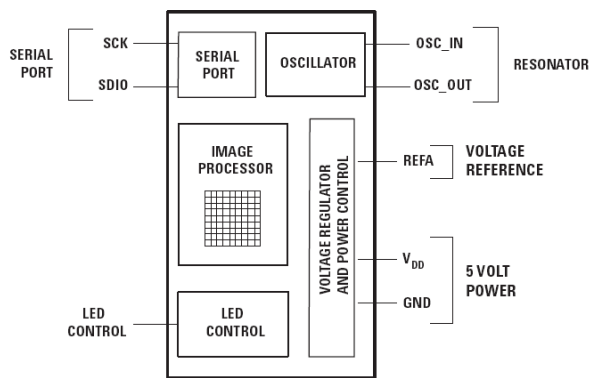


Рис. 7. Блок-схема сенсора оптической мыши ADNS-2610

На основании анализа череды последовательных снимков (представляющих собой квадратную матрицу из пикселей разной яркости), интегрированный DSP процессор высчитывает результирующие показатели, свидетельствующие о направлении перемещения мыши вдоль осей X и Y, и передает результаты своей работы вовне по последовательному порту.

В технической документации на сенсоры представлена принципиальная схема устройства оптической мыши на ADNS-2610 и ADNS-3060 (Рисунок 7). Разрабатываемое устройство слежения не принципиально не отличается от оптической мыши - удалены за ненадобностью кнопки и колесо прокрутки.

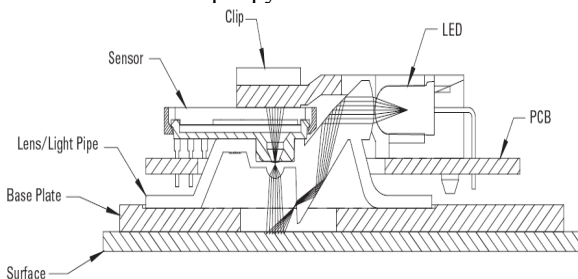


Рис. 8. Устройство оптической системы на основе ADNS-3060

При проведении УЗ контроля должен обеспечиваться необходимый акустический контакт, т.е. поверхность должна иметь шероховатость не хуже Rz 40. Значит устройству позиционирования придется работать на поверхностях вплоть до зеркальных. Оптические мыши с подсветкой светодиода не обеспечивают стабильного слежения перемещений на подобных поверхностях. Однако мышки с источниками когерентного излучения способны дать изображение достаточной резкости (рисунок 8) и могут работать на подобных поверхностях без проблем.

Основные параметры оптического сенсора ADNS-3060: допустимая максимальная скорость перемещения манипулятора (40 дюймов/с),

допустимое ускорение (почти 150 м/с²), частота осуществления снимков (6400 кадров/с), «Разрешение» оптического сенсора может составлять 400 или 800 dpi [6, 7]. Этих значений более чем достаточно для применения этого сенсора в решении обозначенной задачи.

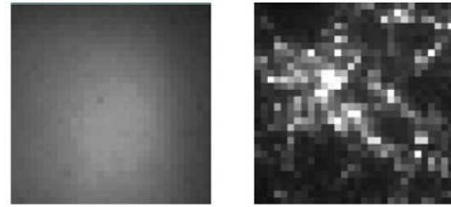


Рис. 9. Изображения полученные с разными оптическими системами (слева- LED, справа - лазер)

Конструктивно координатный датчик может выполняться в одном корпусе с УЗ преобразователем, либо как съемный элемент. Однако в обоих случаях необходимо выдерживать расстояние от элемента Lens до отражающей поверхности под датчиком, которое должно попадать в диапазон от 2,3 до 2,5 мм.

Программно общение возможно при использовании драйверов для оптических мышей, либо специально написанного программного модуля, в котором ставится в соответствие вычисленное в микросхеме перемещение с реальным изменением положения в мм.

Следует проверить способность сенсоров четко отслеживать координату на металлических поверхностях с различными значениями шероховатости.

Возможно возникновение скачкообразных изменений координаты из-за различных дефектов поверхности. Это можно видеть из рисунка 4, на котором приведено изображение герба 50-ти рублевой купюры, полученное сканированием оптической системы на основе датчика ADNS-2051.

Эту проблемы возможно решить при помощи подключения второго оптического сенсора немного развернутого в сканируемой плоскости. Это позволит снизить вероятность подобных скачков как минимум вдвое, однако увеличит габариты самого устройства, что можно исправить перекомпоновкой структурных элементов устройства, а именно источников подсвечивающего излучения. Применение источников когерентного излучения для подсвечивания сканируемой поверхности так же снизит количество подобных ошибок.

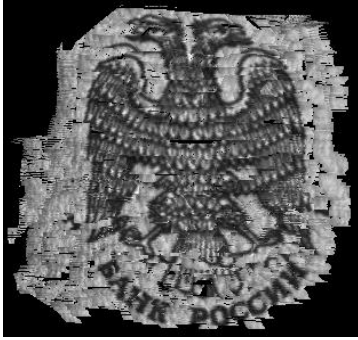


Рис. 10. Изображение полученное сканированием оптической мышью

Заключение

Таким образом, разработан лабораторный макет для изучения и модифицирования SAFT-метода томографии. Все модули обработки и функции располагаются в доступных для использования совместно с другими устройствами динамических библиотеках. После доработки и получения необходимых практических данных по работе данного макета, разработки преобразователя с раскрытым акустическим полем и устройства определения координаты искателя, возможно реализовать дефектоскоп в компактной и удобно для пользователя форме. Так же возможна реализация отдельных блоков искателя (ПЭП, датчик положения, генератор высокочастотных сигналов, блок обработки эхо-импульсов, блок Bluetooth) и блока обработки данных с графическим выводением результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1 Крауткремер, Йозеф. Ультразвуковой контроль материалов : Справочник; пер. с нем. / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер. - М. : Металлургия, 1991. - 750 с.

2 Dussik, K. Th. : Über die Möglichkeit, hochfrequente mechanische Schwingungen als diagnostische Hilfsmittel zu verwerten. Z. ges. Neur. Psych. 174 (1942) 153-168

3 Капранов Б.И., Коротков М.М. Акустические методы контроля и диагностики. Часть 1: учебное пособие.- Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008.- 186с.

4 Давыдов Е.А., Радько В.П. Компьютеризированная технология НК для определения размеров несплошностей сварных соединений ответственных конструкций методом синтезированной фокусирующей апертуры// Техническая диагностика и неразрушающий контроль 2003. №2 с. 32-35.

5 Пасси Г.С. Современная аппаратура для ультразвукового контроля металлоконструкций// В мире неразрушающего контроля 2003г, №1

6 Data subject to change. Copyright © 2007 Avago Technologies Pte. All rights reserved. Obsoletes 5989-3421EN AV02-0117EN - January , 2007

7 Data subject to change. Copyright © 2001 Agilent Technologies, Inc. May 29, 2001 Obsoletes 5968-6591E 5988-3136EN

КОМПЛЕКС ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННО МОДУЛИРОВАННЫХ ПОЛЕЙ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ В ВИДИМОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАЗМЕННОЙ ИНДИКАТОРНОЙ ПАНЕЛИ

Жарков А.В., Кулешов В.К., Учайкина Е.С.

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: dream@sibinet.com

Интроскопическая аппаратура с применением ионизирующих излучений пользуется большой популярностью в различных областях науки, техники да и в повседневной жизни. Существует большое количество интроскопических малодозовых систем, но они обладают характерными недостатками – низкой скоростью получения изображения объекта контроля, либо высокой дозовой нагрузкой на этот объект. На протяжении многих лет в НИИ Интроскопии ТПУ ведутся исследования по использованию газоразрядного преобразователя рентгеновского излучения, который обладает рядом несомненных преимуществ по сравнению с другими детекторами. На данном этапе развития ГРП можно говорить о переходе к использованию в качестве рабочего тела плазму. Разряд в плазме, инициализируемый ионизирующими излучениями, позволяет получать изображение с достаточной большой скоростью (до сотен микросекунд) и при этом доза, необходимая для получения изображения выше естественного радиационного фона всего лишь в несколько раз.

Основные факторы, которые ограничивали применение ГРП являлись: низкая разрешающая способность и низкая контрастная чувствительность. В ряде работ [1,3], посвященных ГРП, предлагалось применить матричную структуру питания ГРП, но с использованием общего газового объема, что не позволяет существенно повысить разрешающую способность (с 0,5 линий/мм до 2-3). Использование плазменной панели дает возможность значительно увеличить этот параметр с возможностью получения изображения в реальном времени, а в перспективе, и для съемки быстропротекающих процессов.

В качестве газовой среды в плазменных панелях обычно используется неон или ксенон. Разряд в газе протекает между прозрачным электродом на лицевой стороне экрана и адресными электродами, проходящими по его задней стороне. После того, как к электродам будет приложено высокое напряжение, плазма начнет перемещаться. Газовый разряд, инициализируемый внешним ионизирующим излучением, вызывает ультрафиолетовое свечение, которое, в свою очередь, инициирует видимое свечение люминофора.

Зажигание пикселя происходит следующим образом. На питающий и управляющий электроды, ортогональные друг другу, с помощью схемы мультиплексирования, в точке пересечения

которых находится нужный пиксель (рисунок 1), подается высокое управляющее переменное напряжение прямоугольной формы. Газ в ячейке отдает большую часть своих валентных электронов и переходит в состояние плазмы. Ионы и электроны попеременно собираются у электродов, по разные стороны камеры, в зависимости от фазы управляющего напряжения. Для «поджига» на сканирующий электрод подается импульс, одноименные потенциалы складываются, и вектор электростатического поля удваивает свою величину. Далее под воздействием ионизирующего излучения происходит разряд — часть заряженных ионов отдает энергию в виде излучения квантов света в ультрафиолетовом диапазоне. В свою очередь, флуоресцирующее покрытие, находясь в зоне разряда, начинает излучать свет в видимом диапазоне 97% ультрафиолетовой составляющей излучения, вредного для глаз, поглощается наружным стеклом. Яркость свечения люминофора определяется величиной управляющего напряжения.

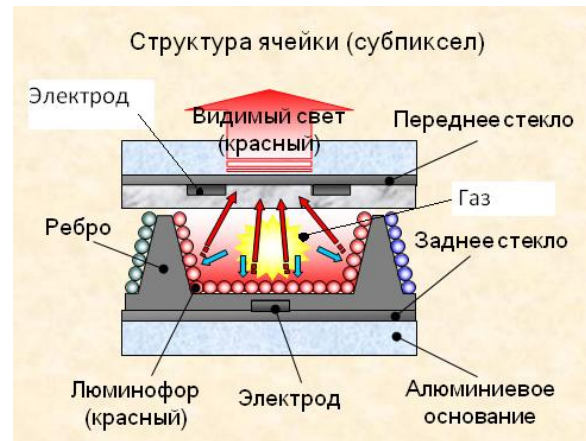


Рис. 1. Структура ячейки плазменной панели

Затем свет проходит через стекло и может без дополнительных устройств восприниматься оператором. Суб-пиксель плазменной панели имеет объём 200 мкм x 200 мкм x 100 мкм. На панели находятся несколько миллионов пикселей, один к одному. Передний электрод выполняется максимально прозрачным. Для этой цели используется оксид индия и олова, проводящий ток и оптически прозрачный. Плазменные панели могут быть большими, а слой оксида настолько тонким, что при протекании больших токов на

сопротивлении проводников возникает падение напряжения, которое значительно уменьшит и исказит сигналы. Поэтому приходится добавлять промежуточные соединительные проводники из хрома, проводящие ток намного лучше, но непрозрачные.

Техническим результатом является повышение разрешения до 8 пар линий на мм, контрастной чувствительности, возможность использования одновременно до 3 трех различных по цветам люминофоров при разных параметрах питания ячеек в целях получения изображения одновременно для разных энергий, а так же потенциальная возможность получения изображения не только визуально, но и в цифровом виде, путем считывания остаточного заряда в ячейках, подвергшихся облучению.

Установки на основе плазменных панелей можно применять в досмотровых системах, в медицинских целях, а так же в определенных условиях в дефектоскопии. Основные преимущества – высокая скорость контроля при хорошем качестве изображения, а так же стоит отметить, что массы и габариты таких установок достаточно малы – использование плазменной панели не требует применения мощных рентгеновских аппаратов, а следовательно их габариты и требования к питающей сети значительно снижаются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алхимов В.Ю., Кулешов В.К., Силантьев О.И., Цицура В.Н. Газоразрядный преобразователь с матричной структурой// Известия Томского политехнического университета. - Томск: ТПУ, 2006 - т. 309. - № 5. - с.56-60.

2. Импульсная рентгеновская техника/С.П. Вавилов. — М.: Энергия, 1981. - 120 с.

3. Цицура В.Н. Моделирование разрядных процессов в условиях дискретно-ячеечной организации газового объема газоразрядного преобразователя рентгеновского излучения в видимое. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: спец. Томский политехнический университет; науч. рук. В.К. Кулешов. — Томск: Б.и., 2007. — 23 с.: ил.

4. Преобразователи рентгеновского излучения с газовым усилением. Учебное пособие / Ю.В. Алхимов, В.К. Кулешов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 284 с.

ИНТЕГРИРОВАННЫЕ АКУСТО-ОПТИКО-ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТВЕРДЫХ, ЖИДКИХ И ГАЗООБРАЗНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Сырямкин В.И., Саньков Д.В., Глушков Г.С., Бородин В.А., Занкина И.С.

Томский государственный университет», г. Томск, 634050

E-mail: D_S_Zhdanov@mail.ru

Проблема неразрушающего контроля долгое время стоит перед инженерами всего мира. Одним из путей решения этой проблемы является телевизионный и акустический анализ состояния наноматериалов.

На рисунке 1 представлена структурная схема многофункционального интеллектуального акусто-оптического микроскопа (МИАОМ).

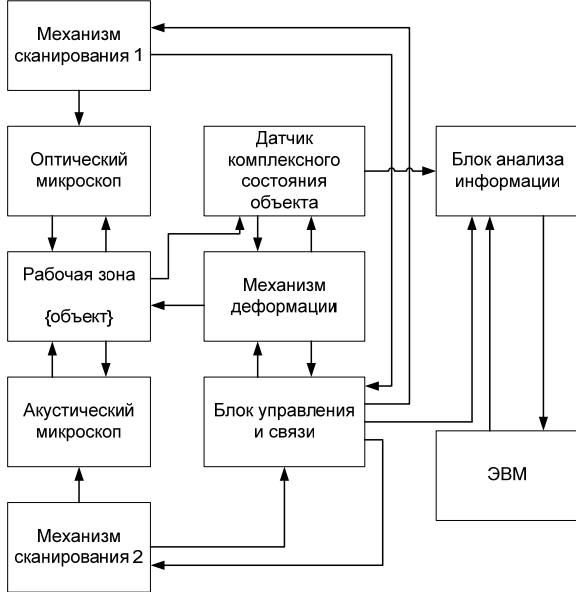


Рис. 1. Структурная схема многофункционального интеллектуального акусто-оптического микроскопа

Приведенные на рис. 1. элементы структурной схемы предназначены для выполнения следующих функций [1-5]:

Механизм деформации – содержит динамометр и механизм растяжения/сжатия; предназначен для деформации образцов.

Механизмы сканирования – служит для перемещения оптического микроскопа и телевизионной камеры над поверхностью исследуемого объекта.

Оптический микроскоп – позволяет увеличивать оптическое изображение поверхности исследуемого объекта в Юч-1000 раз и проецировать его на фоточувствительный элемент телевизионной камеры.

Телевизионная камера – служит для преобразования оптического изображения в электрический аналоговый видеосигнал.

Персональный компьютер – осуществляет запись оцифрованного видеоизображения, его последующую обработку, отображение результатов диагностики на экране дисплея (и/или

напечатанное на принтере), управление комбинированным контроллером управления освещением и шаговыми двигателями.

Акустический микроскоп – реализует комбинированный акустический метод неразрушающего контроля на основе возбуждения импульсных волн напряжения в исследуемом объекте и анализе акустических и эмиссионных характеристик возникающих при этом волн разрядки.

Блок управления и связи – служит для управления механизмом растяжения/сжатия образцов и ввода в персональный компьютер показаний динамометра устройства нагружения.

Осветительное устройство – служит для обеспечения однородного (равномерного) освещения поверхности исследуемого объекта.

Данный вид анализа базируется на следующих положениях (при воздействии на исследуемый объект однократными импульсными нагрузками с равной энергией удара):

- все параметры возникающего акустического сигнала при появлении дефектов изменяются;

- в изделии с дефектами время затухания сигнала уменьшается, а логарифмический декремент затухания возрастает;

- при увеличении числа и размеров дефектов процессы затухания акустического сигнала интенсифицируются;

- максимальная амплитуда сигнала с возрастанием дефектности изделия, как правило, уменьшается, однако, в некоторых случаях, зависящих от взаимного расположения датчика, дефекта, места ударного воздействия и путей прохождения ударной волны, максимальная амплитуда может значительно возрастать;

- с появлением дефектов спектр частот изменяется; происходит смещение отдельных линий спектра, как правило, в сторону меньших частот, уменьшение отдельных частот или их полное исчезновение; появляются колебания с такими частотами, которых не было в бездефектном изделии;

- спектр частот изменяется и в том случае, если изделие остаётся бездефектным, но его размеры уменьшаются;

- энергетический спектр также зависит от дефектности изделий; как правило, с возникновением дефектов и их ростом энергетический спектр размывается, а область частот с максимальной энергией смещается.

Для реализации акустического метода диагностики предлагаются следующие критерии степени накопления повреждений и состояния предразрушения;

- качественная оценка дефектности материала проводится на основе измерения времени затухания акустического сигнала (либо логарифмического декремента затухания);
- количественная оценка размеров трещин на этапе их докритического (хрупко-пластического) роста проводится на основе анализа смещения спектральной линии, соответствующей исходной собственной частоте колебаний;
- количественная оценка размеров трещин на стадии их магистрального развития проводится на основе анализа смещения спектральной линии, соответствующей исходной собственной частоте колебаний;
- диагностика состояния предразрушения нагруженного материала осуществляется на базе одновременного наличия двух признаков: резкого ослабления энергии спектральной линии с исходной частотой колебаний (вплоть до полного её исчезновения) и нарастания скорости смещения спектральной линии с исходной частотой в область меньших частот [1-5].

На основе алгоритма акустического анализа был разработан прибор, осуществляющий сбор информации об исследуемом наноматериале и передачу ее на персональный компьютер для дальнейшей ее обработки.

Прибор позволяет провести как экспресс-анализ, так и подробное обследование объектов с определением и записью акустических характеристик, что дает возможность обнаружить наличие и определить характер дефектов (трещины, дефекты плавки и другие дефекты в материале обследуемого объекта).

Работа прибора основана на принципе приема, регистрации и анализа акустических сигналов, возникающих в объекте обследования в результате импульсного воздействия источника волн напряжений. Возникающая волна напряжений, проходя по объекту, изменяет акустические характеристики при наличии дефектов. Акустические сигналы снимаются пьезокерамическим датчиком, преобразуются в электрические колебания и поступают в прибор для обработки.

Прибор выполнен на базе микросхем высокой степени интеграции, что позволило минимизировать габариты и массу прибора, получить высокую надежность функционирования за счет уменьшения числа элементов и межсоединений, малое энергопотребление.

Новизна решений, заложенных в основе МИАОМ:

1. Одновременно оптический (поверхностный) и акустический (внутренний) контроль состояния материала (объекта).

2. Анализ оптических (телевизионных) изображений различных размерностей и цветностей поверхности материала.

3. Возможность исследования поверхности материала при одновременном механическом воздействии (сжатии и растяжении).

4. Исследования комплексного состояния материала (оптических, механических, электрофизических и тепловых характеристик).

5. Возможность исследования (аттестации) больших размеров образцов материала (до 200x200x500 мм).

6. Возможность аттестации наноматериалов (нанопорошков).

Программные пакеты «Asadm32» и «DefectoScor» предназначены для обработки цифровых сигналов, полученных с прибора.

При обработке цифровых сигналов используются алгоритмы цифровой фильтрации и спектрального анализа (вычисление дискретного и быстрого преобразования Фурье – ДПФ и БПФ), алгоритмы корреляционного анализа.

В программе реализованы возможности:

- отображения сигнала в произвольном масштабе;
- определение спектра сигнала;
- определение функции взаимной корреляции;
- оперирования произвольным количеством сигналов;
- наложение полосового фильтра.

В докладе так же рассмотрены алгоритмы диагностики жидких и газообразных наноматериалов [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов: В 2 т. / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин, П.В. Макаров и др. – Новосибирск: Наука, 1995. - Т.1 - 298 с.
2. Системы технического зрения. Справочник Под ред. В.И. Сырямкина и В.С. Титова. Томск: МГП «РАСКО», 1992. - 367 с: ил.
3. Корииков А.М., Сырямкин В.И., Титов В.С. Корреляционные зрительные системы роботов. - Томск: Радио и Связь. Том. отд-ние, 1990. -264с.
4. Бубенчиков М.А., Газиева Е.Э., Гафуров А.О., Глушков Г.С., Жданов Д.С., Саньков Д.В., Сырямкин В.И., Шидловский С.В., Юрченко А.В. Современные методы исследования материалов и нанотехнологий. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2010. – 366 с.
5. Сырямкин В.И. Устройство для контроля механического состояния объектов. Патент на полезную модель №87515 от 10 октября 2009 г.

ТЕПЛОВОЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ В ПРОИЗВОДСТВЕ ДИОДОВ ГАННА

Юрченко В.И., Юрченко Н.М.

ОАО НИИПП, г. Томск

В разработке диодов Ганна за последнее десятилетие была проведена удивительная изобретательность для использования любой возможности, улучшения тепловых режимов работы диодов. Гарантией успешного применения диодов Ганна, как вновь разрабатываемых, так и серийно выпускаемых, является знание параметров и ограничений присущих этим диодом. Одним из таких параметров является тепловое сопротивление R_T , задающее ограничение по уровню максимальной выходной мощности, снижающее надежность и повышающее уровень шума. Неразрушающие измерения теплового сопротивления в технологическом цикле сборки и испытаний диодов Ганна является необходимым условием контроля качества этих технологических процессов.

В статьях [1,2,5] и патентах [3,6,7] описаны метод и установка пригодные для контроля R_T в производственных условиях. Контроль R_T необходим в трех случаях:

- при установлении норм на величину R_T при технологических испытаниях;
- при отработке режима посадки кристалла в корпус;
- при контроле стабильности и воспроизводимости процессов монтажа кристаллов в корпус.

Экспериментальное исследование различных типов диодов Ганна (прямого монтажа, обратного монтажа и с интегральным теплоотводом) показывают обратную зависимость между величиной теплового сопротивления и генерируемой СВЧ мощностью.

$$P_{\text{вых}} = \left(\frac{\Delta T}{R_T} \right) \left(\frac{\eta}{1 - \eta} \right)$$

Наибольшую величину теплового сопротивления ($R_T = 50-1300 \text{C/Вт}$) имеют диоды прямого монтажа (3А721-3А724), а наименьшую величину R_T имеют диоды обратного монтажа $R_T = 8-30 \text{C/Вт}$. Причем температура перегрева для первых составляет $80-200 \text{C}$, а для вторых $30-150 \text{C}$. Диоды алмазным теплоотводом имеют тепловое сопротивление $R_T = 6-10 \text{C/Вт}$ меньшее чем полученные на тех же кристаллах $R_T = 10-16 \text{C/Вт}$, но на медных кристаллодержателях. Это

совпадает с расчетными данными, дающими в 1,5-2 раза меньшие значения R_T . К сожалению процент выхода годных при сборке диодов на алмазных теплоотводах чрезвычайно низок из-за отсутствия методов разбраковки алмазных теплоотводов по коэффициенту теплопроводности, по качеству металлизации и трудностей монтажа кристаллов на алмазный теплоотвод. На диодах из НИИ «Орион» г.Киев на интегральном теплоотводе получены следующие данные: в прямой полярности $R_T = 15-500 \text{C/Вт}$ и обратной полярности $R_T = 70-1600 \text{C/Вт}$. В рассмотренном случае измерение R_T обусловлено конструктивно-геометрическими параметрами и типом диодов. Вместе с тем сборка одних и тех же кристаллов методом УЗ микросварки и методом пайки в печи через сплав золото-германий показывают практически одни и те же значения R_T соответственно $R_T = 13,4 \text{C/Вт}$ и $R_T = 13,10 \text{C/Вт}$.

Анализ показывает, что увеличение теплового сопротивления обусловлено двумя причинами: ухудшением качества монтажа кристалла на теплоотвод и снижением теплопроводности самой активной области за счет дефектов вводимых в активную область диода превышением механических и температурных нагрузок в процессе сборки. Характерно наличие резко выраженного максимума по мощности (минимума по R_T) для амплитуды ультразвука $A=11$. Этот факт указывает на необходимость четкого поддержания величины ультразвука. Более подробно о влиянии режимов УЗ микросварки описано в работе [4]

Измерение теплового сопротивления однотипных диодов, изготовленных из одной и той же структуры при одних и тех же параметрах процесса монтажа, показывают существенную дисперсию δR_T и $\delta P_{\text{вых}}$. Почти 40% диодов

$$\frac{R_T}{R_{T\text{нор}}} \geq 2$$

имеют $\frac{R_T}{R_{T\text{нор}}} \geq 2$, что существенно уменьшает процент выхода годных по уровню мощности. В таблице приведены данные по средней величине R_T и $P_{\text{вых}}$ по 8 партиям диодов 3А716 (по 20 шт.), изготовленных по с.л. 114 из кристаллов, полученных из одной пленки.

Таблица 1

Сл.лист	56	55	54	59	61	60	63	65	средне е	Δ
Среднее по партии R_T , $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$	16,34	16,87	13,82	14,53	15,14	14,51	14,0	15,7	15,11	+1,76 -1,29
Средняя по партии $P_{\text{вых}}$, мВт	336	276,9	290,5	262	339,5	236	223	301,5	287	+50 -64

Разброс средних значений от партии к партии, как по R_T , так и по мощности не превышает точности измерений (меньше 20%). Такой же эксперимент, проведенный для диодов 3A728 дает иную картину.

Таблица 2

Сл.лист	1	% диодов отличных от нормы	2	% диодов отличных от нормы	3	% диодов отличных от нормы
Среднее по партии R_T , $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$	24,2	20	23,3	0	26,2	50% больше 25
Средняя по партии $P_{\text{вых}}$, мВт	143,6	20	129	10	119	50% меньше 120

Проводилась работа по выбору оптимального режима термокомпрессии кристаллов из одной пленки были высажены четыре разными режимами. Из каждой партии на 50 штукках случайно отобранных диодах были измерены значения R_T .

Таблица 3

Режим Значение R_T	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	> 18	Ср. значение R_T
1 режим, $P=27$, $A=7$, $t=0,4$, $T=400$	1	5	9	11	7	12	2	15	3	1	1	12,4
2 режим, $P=29$, $A=8$, $t=0,4$, $T=400$	6	14	16	11	2	2	-	-	-	-	-	10,67
3 режим, $P=36$, $A=9$, $t=0,4$, $T=400$	8	8	7	9	3	3	2	2	3	-	-	11,97
4 режим $P=24$, $A=5$, $t=0,4$, $T=400$	-	2	3	5	5	2	5	6	6	2	16	15,92

Таблица 4

Для первых трех режимов диоды были испытаны

Наименование операции	Процент выхода по операциям		
	Режим 1	Режим 2	Режим 3
Измерение R_T после сборки	98,4	99,6	99,2
Измерение параметров	98,4	96,3	81,8
Электровоздействие	94,7	98,3	100
Измерение до ударов	100	100	99
Измерение после ударов	100	100	96
Измерение после влаги	100	99,6	100
Токовая тренировка	94,8	97,9	96,8
Измерение параметров	90,5	98,7	91,4
Общий процент выхода	78,7	90,7	68,2

Второй режим, обеспечивает более качественную сборку с наиболее высоким процентом выхода и минимальным значением и разбросом теплового сопротивления. Влияние обработки кристаллов перед посадкой также ведет к незначительным изменениям теплового сопротивления. Так для 3A719 при стандартной обработке среднее $R_T = 20,2$ °C/Вт, а при дополнительной химической обработке R_T уменьшается до 19°С/Вт, а обработка в плазме дает еще большую величину уменьшения до 17,5°С/Вт. Хотя вместе с тем обработка катодного контакта увеличивает тепловое сопротивление до 22°С/Вт. Средние величины СВЧ мощности соответственно 141, 99, 113, и 89 мВт.

Проведенные исследования различных типов диодов не позволили выявить взаимосвязь между величиной R_T и следом оставляемым на кристаллодержателе при отрыве кристалла (как заложено в технологической карте). Качество посадки по двум факторам величине R_T и однородности посадки по всей поверхности кристалла. Первый подход обусловлен необходимостью получения максимальных величин выходных мощностей, а второй подход обеспечивает наиболее механически прочное соединение кристалла с кристаллодержателем. Причем есть диоды у которых кристалл очень слабо держится на поверхности кристаллодержателя, но при этом имеет малую величину R_T и $R_{\text{вых}}$.

Каждая партия характеризуется следующими величинами определяющими процент выхода годных диодов и качество выполнения процесса сборки, а именно:

- $\overline{R_T}$ -средней величиной теплового сопротивления,

- $\Delta R_T = R_{T_{\text{max}}} - R_{T_{\text{min}}}$ - размах (разброс) величины теплового сопротивления в партии,

- N_1 - число диодов с $R_T \leq R_{Tn}$ для данного типа диодов.

Для оптимальных режимов характерна минимальная величина R_T , размах ΔR_T и максимальное число N_1 .

На примере диодов типа 3A727 (сл. Лист по диоду №27, по кристаллу №131) было собрано 220 диодов из которых по R_0 после герметизации осталось 187 диодов. Распределение диодов по тепловому сопротивлению представлено на рис. Из этих диодов были сформированы две группы: одна для диодов $R_T \leq R_{T0} = 24$ с общим числом 65 штук и вторая с $R_T \geq R_{T0}$ с общим числом 122 штуки. По результатам измерений СВЧ мощности и электровоздействия в первой группе годными оказались все 100%, а во второй группе лишь 70% (56%). После токовой тренировки в первой группе осталось 50 шт. (10 шт. КЗ, 5 шт.

сломали), а во второй группе 58 шт. (12 обрывов), то есть 79,4% и 82% соответственно годных относительно оставшихся после электровоздействия и 79,4% и 46,7% относительно собранных. Окончательно годных после определения рабочего диапазона осталось соответственно 45 и 52 шт. (71,4 и 41,9%) . Таким образом процент выхода годных почти в 1,7 раза больше при проведение приемосдаточных и технологических испытаний.

Представляет интерес изменение не только средних значений, но и динамика изменения распределения теплового сопротивления. На примере диода 3A728 показано что среднее значение R_T минимально при Ф-3, при этом дисперсия его также минимальна, а СВЧ мощность имеет минимальную дисперсию и все диоды выдают мощность более 90 мВт, то есть 100% годных. При уменьшение УЗ возрастает доля более высоких R_T , а также число не приваренных кристаллов. Для распределений характерно плавное изменение распределения в сторону больших R_T . При увеличение А от 3 до 5 в распределение R_T появляется группа с R_T больше 40 °С/Вт и в распределение СВЧ мощности группа с мощностью менее 90 мВт. Это вероятнее всего обусловлено наличием кристаллов с дефектами, которые при ужесточение режимов более интенсивно деградируют. Таким образом контроль R_T позволяет контролировать стабильность выполнения операции сборки и устанавливать для ДГ допустимые нормы на величину R_T в зависимости от требуемого уровня выходной мощности.

С точки зрения стабильности выпуска диодов важно выявить факторы ведущие к увеличению дисперсии (разброса) R_T . Прежде всего необходимо выделить вклад разнообразия параметров кристаллов (разнотолщинность эпитаксиальных слоев, толщина и качество металлизации и т. далее) и определить границы влияния нестабильности режимов монтажа.

Анализ интенсивности отказов [4] в зависимости от времени наработки показывает наличие двух областей в начале и в конце срока службы. Первая начинается сразу после изготовления в начале наработки и обусловлена дефектами введенными в процессе изготовления ДГ. Именно в этой области на стадии технологических испытаний важен контроль R_T исследование отказов при проведение токовой тренировки показывает, что большая часть отказов наблюдается в первые 24 часа. Анализ R_T показывает, что в начале отказывают диоды, имеющие величины R_T в 1,5-2 раза превышающие допустимую норму R_T . Для определения причин приводящих к изменению параметров на 1 участке проводились исследования изменения в течение 50 часов следующих параметров $U_{\text{пор}}$, $I_{\text{пор}}$,

измеряемых в непрерывном и импульсном режиме, $U_{\text{проб}}$ – измеряемом в импульсном режиме, $U_p, I_p, P_{\text{вых}}$, R_T, R_o . Очень слабо изменяются U_p, I_p (меньше 10%) причем как в сторону уменьшения, так и увеличения. Слабо изменяются $U_{\text{пор}}, I_{\text{пор}}, R_o$, измеряемы е в непрерывном режиме и приблизительно поровну как в сторону увеличения, так и уменьшения. Тот же характер имеют выходная мощность и КПД, что, прежде всего, обусловлено изменением рабочих тока и напряжения. Наиболее интенсивно изменяются импульсные пороговые параметры $U_{\text{пор}}, I_{\text{пор}}$ и $U_{\text{проб}}$. Причем $U_{\text{проб}}$ и $U_{\text{пор}}$ в основном увеличиваются, а $I_{\text{пор}}$ в основном уменьшается. Тепловое сопротивление R_T как правило остается постоянным или слабо увеличивается. Важным является то, что наиболее интенсивно изменяются все величины у диодов имеющих большую величину R_T . Следовательно R_T , а точнее температура активной области способствует изменению параметров активной области.

Как влияет квалификация и индивидуальный подход на процент выхода говорят следующие данные: три оператора собирали на одной и той же установке. У первого оператора получились диоды с 91% выхода годных (R_T меньше 25, P больше 120 мВт) со средним значением $R_T = 24, 2^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ и $P = 122$ мВт. Для второго оператора характерны следующие данные 89% выхода годных при $R_T = 23,3^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ и $P = 129$ мВт. Третий оператор смог получить лишь 53% годных при $R_T = 26,2^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ и $P = 119$ мВт. Таким образом существуют факторы, которые пока еще являются неопределенными технически и зависят от индивидуального мастерства оператора.

Выводы

1. Исследования подтверждают необходимость контроля теплового сопротивления ДГ в их производстве.

2. Установлено, что применение контроля теплового сопротивления необходимо

- При периодическом и технологическом контроле воспроизводимости процессов монтажа однотипных кристаллов в корпус,

- При отработке режимов монтажа кристаллов в корпус,

- Для отбраковки не пригодных ДГ в процессе приемочных и технологических испытаний.

3. Установлены нормы на величину теплового сопротивления по уровню выходной СВЧ мощности и проценту выхода годных для ДГ выпускаемых на предприятии.

4. Выявлены факторы определяющие дисперсию величины теплового сопротивления серийно выпускаемых ДГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.И. Юрченко. В.И. Купряков Установка для измерения теплового сопротивления. Информационный листок N82 –1150 серия ИЛКИА –13-05(1982).

2. В.И.Юрченко, В.Л.Щербаков, А.А.Смагин Контроль теплового сопротивления для оценки деградации диодов Ганна Программа Второго симпозиума «Эффект Ганна и его применение» Новосибирск, 16 – 18 ноября 1982, стр.6.

3. А.С.N1245093 Устройство для измерения теплового сопротивления диодов Ганна (Классификатор диодов Ганна по тепловому сопротивлению) Купряков В.И., Бричанский В.Г., Юрченко В.И. Заявл.29.03.84. Оpubл.15.03.86

4. В.И. Юрченко Исследование ультразвуковой микросварки кристаллов диодов Ганна с использованием измерения теплового сопротивления. Электронная техника сер.2.Полупроводниковые приборы .1986. вып.5.с.101 – 104

5. В.И. Юрченко. Методы и установки измерения теплового сопротивления диодов Ганна. Электронная промышленность №2-3, 2002 г., стр.179-180.

6. А.С.N 705390 Способ определения теплового сопротивления диодов Ганна Полисадов С.Н., Смагин А.А., Шаповал Л.Г. Юрченко В.И. Заявл. 23.06.78. Оpubл. 13.07.79.БИ N 47 от 25.11.72.

7. А.С.N 705390 Способ определения теплового сопротивления диодов Ганна Полисадов С.Н., Смагин А.А., Шаповал Л.Г. Юрченко В.И. Заявл. 23.06.78. Оpubл. 13.07.79.БИ N 47 от 25.11.72.

8. А.С.N 1101093 Полупроводниковый диод с двойным теплоотводом Лавренков А.В., Неудачин В.И. Юрченко В.И., Шаповал Л.Г., Ким Я.И. Заявл.23.06.80. Оpubл. 11. 03. 84.

ТЕХНОЛОГИЯ PLC И ЕЕ ПЕРСПЕКТИВЫ В РАЗВИТИИ АСКУЭ

Николенко К.В., Юрченко А.В.

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: rubos_saboteur@mail.ru

О технологии PLC (PowerLineCommunication)[1] или «Связь по электросети» так или иначе слышали многие, однако о реальных возможностях технологии осведомлено лишь небольшое количество специалистов. Отчасти это связано с информационной политикой производителей и невнятным маркетингом, который не учитывал российские реалии, отчасти виноваты болезни роста, поскольку первая и вторая версия стандарта работали не так хорошо, как хотелось бы. В этом обзоре представлен свежий взгляд на возможности этой интересной технологии, которая базируется на стандарте, одобренном UPA в 2006 году. Этот стандарт обеспечивает физическую скорость передачи данных до 200 Мбит/сек в режиме полу-дуплекс, что соответствует максимальной скорости передачи реальных данных 80 мбит/сек в полнодуплексном режиме. Максимальная скорость ниже пропускной способности FastEthernet из-за издержек на служебный трафик и избыточность данных для протокола коррекции ошибок.

На отечественном рынке технология PLC известна прежде всего решениями типа «Домашняя сеть по электропроводке» которые представлены такими брендами как Zyxel, Dlink, Qlan. А также компанией «Инкотекс» представлены системы сбора передачи данных в рамках АСКУЭ.

Суть технологии

Основой технологии Powerline является использование частотного разделения сигнала, при котором высокоскоростной поток данных разбивается на несколько относительно низкоскоростных потоков, каждый из которых передается на отдельной поднесущей частоте с последующим их объединением в один сигнал (рис.1).

При использовании обычного частотного мультиплексирования (FDM - Frequency-Division Multiplexing) защитные интервалы (GuardBand) между поднесущими, необходимые для предотвращения взаимного влияния сигналов, довольно велики, поэтому доступный спектр используется не очень эффективно.

В случае же ортогонального частотно-разделенного мультиплексирования (OFDM), центры поднесущих частот размещены так, что пик каждого последующего сигнала совпадает с нулевым значением предыдущих (рис.1). Такое размещение позволяет более эффективно использовать доступную полосу частот.

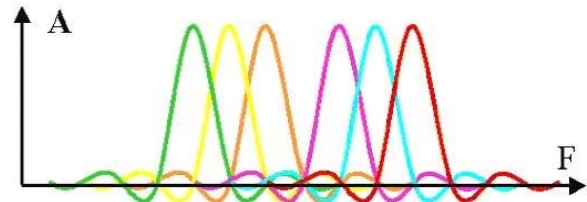


Рис. 1. Ортогональное частотно-разделенное мультиплексирование (OFDM)

Перед тем как отдельные поднесущие частоты будут объединены в один сигнал, они претерпевают фазовую модуляцию, каждая -- своей последовательностью бит.

После этого все они проходят через PowerPacketengine и собираются в единый информационный пакет, который еще называют OFDM-symbol. На рисунке 2 приведен пример относительной квадратурной фазовой манипуляции (DQPSK - Differential Quadrature Phase Shift Keying) на каждой из 4-х поднесущих частот в диапазоне 4-5 МГц.

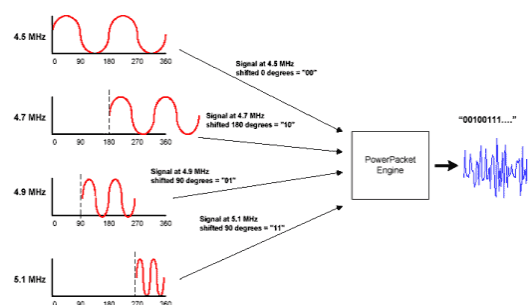


Рис. 2. Относительная квадратурная фазовая манипуляция (DQPSK)

Реально в технологии Powerline используются 84 поднесущие частоты в диапазоне 4-21 МГц. Теоретическая скорость передачи данных при использовании параллельных потоков с одновременным фазовым модулированием сигналов составляет более 100 Мб/с. Адаптация к физической среде, устранение ошибок и разрешение конфликтов. При передаче сигналов по бытовой сети электропитания могут возникать большие затухания в передающей функции на определенных частотах, что приведет к потере данных [2].

Существующие решения на основе PLC

«Меркурий-ЭНЕРГОУЧЁТ» - это современная АИИС ориентированная на применение в жилом и мелкомоторных секторах, коттеджных и дачных посёлках, а так же для учёта на вводах

трансформаторных подстанций 6(10)/0,4 кВ. Отличительной особенностью нашей системы от множества других является то, что контроль за потреблением электроэнергии осуществляется по силовой распределительной сети 0,4 кВ. В отличие от АИИС КУЭ, построенных на базе счётчиков с традиционными проводными цифровыми интерфейсами RS-485 или подобными, отсутствие объединяющего интерфейсного кабеля значительно удешевляет стоимость монтажных работ и последующую эксплуатацию системы, при этом увеличивается надёжность функционирования и вандалоустойчивость. Совокупная стоимость системы практически определяется суммарной стоимостью электросчётчиков. Технические решения применённые при разработке коммуникационного оборудования являются уникальными среди подобных устройств и защищены двумя патентами РФ.

Кроме того в Европе и Америке, а с недавнего времени и в России, широко применяются малые сети на основе PLC технологий. Пример малой сети приведен на рисунке 3.

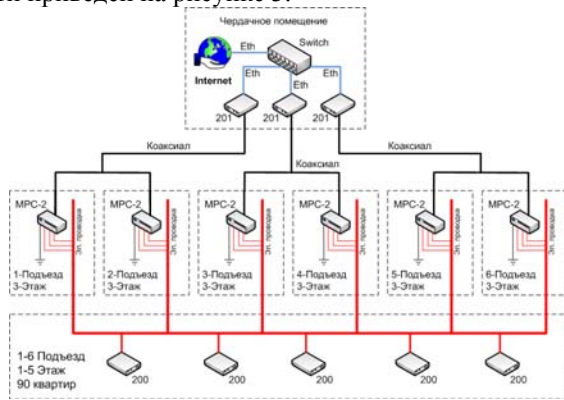


Рис.3. Малая сеть многоквартирного дома

Учитывая тенденции развития отраслей IT и электроэнергетики, взаимную интеграцию, можно предполагать, что следующим этапом развития АСКУЭ может стать комбинированная или гибридная сет передачи данных. Такая сеть способна не только собирать данные с точек учета, но и предоставлять доступ в информационное поле абонентам. В связи с этим развитие технологий широкополосного доступа посредством PLC является перспективным направлением.

На сегодняшний день отрасль активно развивается. И в феврале 2011 года был принят новый стандарт IEEE 1901. Международная некоммерческая техническая профессиональная ассоциация

Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc. (IEEE) предварительно утвердила стандарт 1901, который в перспективе позволит передавать данные по электросети на скорости до 500 Мбит/с.

Спецификации нового стандарта подразумевают скорость передачи данных на

физическом уровне (в реальных условиях) до 500 Мбит/с. Предварительно финальные спецификации стандарта были утверждены уже в 11-го февраля 2011 г.

Начало развитию услуг доступа в Интернет было положено в 2004 г. В июле 2004 г. IEEE объявил о создании группы разработки нового стандарта, проект носил наименование IEEE P1675, Standard for Broadband over Power Line Hardware. Его разработка и ратификация были завершены в сентябре 2008 г. Помимо IEEE P1675 существуют еще три проекта в этой же предметной области: IEEE P1775, инициированный 12 мая 2005 г. с целью регламентирования PLC-оборудования, требований по электромагнитной совместимости, методов тестирования и измерения; IEEE P1901, Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications, обеспечивающий описание физического уровня и уровня доступа к среде для всех классов BPL-устройств (ратифицирован в сентябре 2010 г.); IEEE BPL Study Group, Standardization of Broadband Over Power Line Technologies, обеспечивающий создание новых групп, связанных с BPL.

Кроме того в России уже прошли сертификацию и поступили в розничную продажу маршрутизаторы и преобразователи фирмы ZyXEL. Но тут стоит отметить, что Powerline-оборудование ZyXEL применяется не для подключения услуг Интернета, а для удобной разводки уже имеющегося интернет-подключения по квартире (в разные комнаты), без прокладки дополнительных коммуникаций (не нужно прокладывать Ethernet-кабель), используя имеющуюся в помещении электропроводку.

На данном этапе развития технология PLC может потеснить на рынке предоставления широкополосного доступа такие традиционные технологии как Ethernet и даже WiFi. В связи с принятием нового стандарта IEEE 1901 отрасль начинает следующий виток развития, а уже имеющиеся технологии могут позволить электрокомпаниям совмещать предоставление услуг по энергообеспечению с предоставлением услуг в сфере коммуникаций. А это не только интернет, но и телефония, телевиденье (более того HDTV).[3]

Таблица 1

Сравнительный анализ технологий обмена информацией в АСКУЭ

Технология	Состав	Посредник	Возможность вмешательства	Достоинства	Недостатки
Ручной контроль	S	Человек	+	Нет	Большая вероятность ошибки, преднамеренного Внесения неверных показаний, Большой штат сотрудников
RS232/485	S-K-L-C	-	-	Простота реализации в небольших и не распределенных сетях	Наличие дополнительных линий связи
GSM	S-K-L-C	Сотовый оператор	-	Простота реализации для 1-ой точки контроля	Необходима организация счетчиков в малую сеть, установка УСПД и лишь затем передача данных
PLC	S-K-C	-	-	Использование готовых линий связи	Плохое качество линий (относится в меньшей степени к новостройкам)
Radio/GTC	S-K-L-C	Сертификация частот/ Телефонная компания	-	Нет необходимости в линиях связи	Необходимо резервирование частот
LAN	S-K	Интернет провайдер	-	Минимальный набор оборудования (количественно сравним с PLC)	Необходимо наличие интернет провайдера, что увеличивает расходы

S– наличие в системе счетчика;

K- наличие в системе концентратора (УСПД);

L- наличие в системе дополнительных линий связи;

C- наличие в системе средства связи в диспетчерском пунктом и/или ЦДП.

В НИ ТПУ в 10-м корпусе была построена экспериментальная АСКУЭ на этапе т.н. «последней мили» с применением оборудования компании «Инкотекс» (рис. 4). Согласно проведенным исследованиям затухание PLC гораздо меньше ожидаемого. Получение PLC пакетов в рамках одной ТП составило 100%. Т.о. технология PLC как нельзя лучше подходит для локальных сетей сбора-передачи данных. Основным питающим элементом сети являются солнечные батареи, установленные на крыше 10-го корпуса ТПУ. Как известно, солнечные батареи генерируют постоянный ток, а для питания большинства приборов необходим переменный ток. Поэтому ток поступающий от солнечных

батарей преобразовывается в переменный при помощи инвертера AC-DC. Далее, с целью упрощения расчетов с электро-компанией, необходимо точно знать количество (кВт/ч) произведенной энергии, и количество потребленной от городской сети. Для этого в системе присутствуют 2 счетчика, а именно «Меркурий 203 2Т» на входе после инвертера, и «Меркурий 201» на входе от городской сети 220В. Кроме того, в системе присутствует блок аккумуляторных батарей, которые заряжаются от солнечных в ясную погоду, и разряжаются, отдавая энергию в сеть, в сильно пасмурную погоду или ночью. Таким образом система учитывает не только мгновенно потребляемую

энергию (как от сети, так и от PV элементов), но и энергию потребляемую после накопления. Генерирующая сеть питает оборудование в лаборатории. На данный момент это компьютеры и оргтехника.

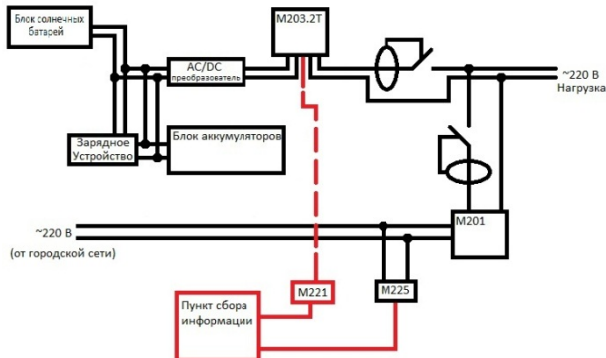


Рис. 4. Схема АСКУЭ генерирующей сети

Помимо этого в рамках НИР были проведены исследования влияния на сигнал PLC различных факторов. Как например медная или алюминиевая проводка используется в ТП. В 10-ом корпусе ТПУ присутствуют оба типа проводки. Ниже, на рисунке 5, приведены осциллограммы сигналов:

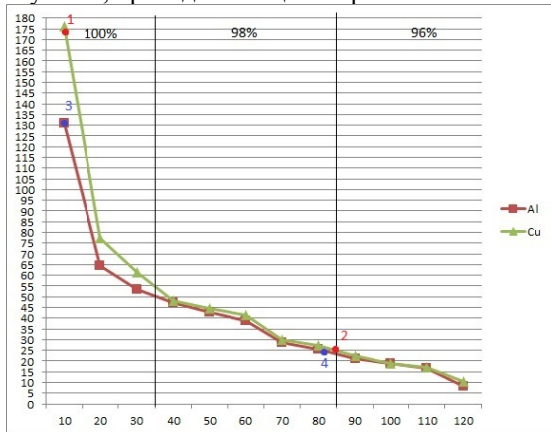


Рис. 5. Амплитуды PLC, уровень приема

Более подробно рассмотрим падение амплитуд в точках 1-2 для медной проводки и 3-4 для алюминиевой.

В точке 1 (рис. 6) амплитуда сигнала равна 176 мВ, уровень приема 100%.

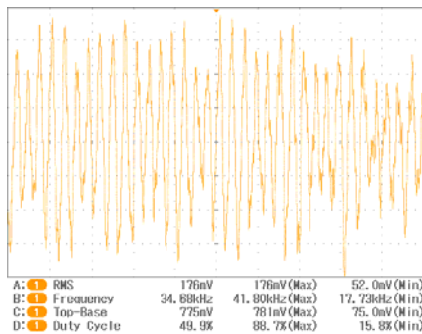


Рис. 6. Осциллограмма в точке 1

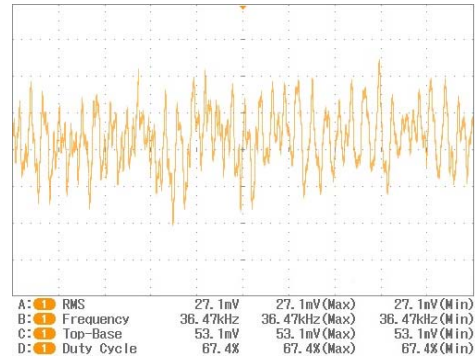


Рис. 7. Осциллограмма в точке 2

В точке 2 (рис. 7) мы же видим падение амплитуды до 27,1 мВ, хотя уровень приема сигнала по прежнему уверенны, и составляет 98%, благодаря принципам пакетной передачи данных.

В алюминиевой проводке уровень сигнала, при прочих равных условиях, слабее. Как видно в точке 3 (рис. 8) (находящейся на таком же расстоянии от передатчика, что и точка 1) амплитуда сигнала меньше, чем в точке 1. Амплитуда сигнала – 131 мВ, уровень приема 100%.

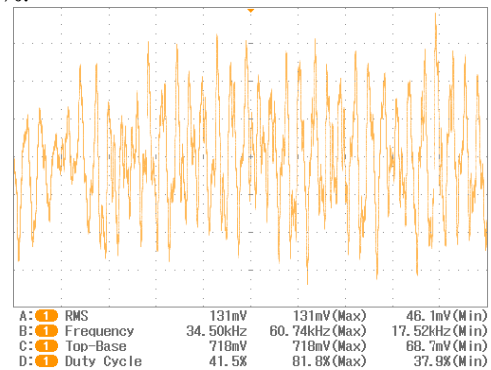


Рис. 8. Осциллограмма в точке 8

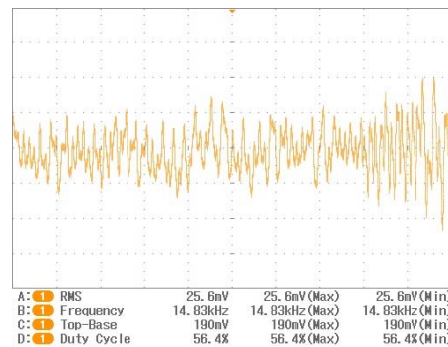


Рис. 9. Осциллограмма в точке 4

Падение же уровня происходит по тому же закону, что и в медной проводке. И в точке 4 (рис. 9) амплитуда сигнала – 25,6 мВ, уровень приема 98%.

Затухание высокочастотных сигналов алюминии выше, чем в меди, т.к. удельное сопротивление: Al - 0,028 Ом*мм²/м, в то время как Cu - 0,0175 Ом*мм²/м.

Согласно полученным данным и проведенных тестов можно сделать вывод, что применять PLC для какой-либо связи (в рамках технологического процесса, АСКУЭ, широкополосного доступа в сеть интернет и/или предприятия) лучше при наличии медной проводки в здании. PLC является в достаточной мере помехозащищенным типом связи, в рамках исследований сбой были крайне редким явлением. PLC отлично подходит для связи в генерирующих сетях, т.к. в таких сетях, как правило, нет сдвига частоты переменного тока, что всегда присутствует в городских сетях, ввиду неравномерного вращения турбины. Сравнительный анализ позволяет с уверенностью утверждать, что PLCнаименее затратная технология в обслуживании. Безусловно присутствуют изначальные затраты на развертывание, но за счет отсутствия как посредников, так и дополнительных линий связи, стоимость обслуживания ниже других технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. IEEE P1901 and the HomePlug Alliance – [Электронный ресурс] – Режим Доступа:[http://www.homeplug.org/tech/ieee_1901/\(20.03.2011\)](http://www.homeplug.org/tech/ieee_1901/(20.03.2011))
2. Вячеслав Уютов Предоставление доступа в Интернет на базе технологии PLC стр. 38-41. Журнал "Технологии и средства связи" #4, 2007.
3. Николенко к. В., Юрченко а. В. Передача данных по рlc-сети. Возможности и перспективы// Ресурсоэффективные технологии для будущих поколений. Сборник трудов II Международной научно-практической конференции молодых ученых. 23 - 25 ноября 2010 г. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – с. 445-447
4. Николенко К. В., Юрченко А.В., Волгин А.В. Технология PLC и ее перспективы на российском рынке широкополосного абонентского доступа // Информационно-измерительная техника и технологии: сборник материалов I Научно-практической конференции, посвященной 50-летию кафедры «Информационно-измерительная техника» Национального исследовательского Томского политехнического университета/ под ред. А.В. Юрченко; - Томск, НИ ТПУ, 25-26 февраля 2010. - Томск: Изд. ТПУ, 2010. - С. 74-75

СИММЕТРИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИНЦИПА ПРИЧИННОСТИ В СТРУКТУРНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ МЕТОДАХ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Баранов В.А., Эверт У.*

НИИ НК при Томском Политехническом Университете

*Bundesanstalt für Materialforschung und prüfung, г. Берлин, Германия

E-mail: ram1@mail.tomsknet.ru

Структурное описание объектов контроля и классический принцип причинности

В разрабатываемых авторами теоретико-групповых методах восстановления изображений [4,5,6] объект реконструкции представляется структурой, т.е. неким целым, устойчивым относительно определенных внешних и внутренних изменений, которые формально задаются его группой автоморфизмов [1]. Решение реконструктивной задачи основывается на статистической оценке структурных инвариантов объекта, что, в свою очередь позволяет выявлять структурно-функциональные связи объекта.

Целью данной работы является анализ причинно-следственных связей в методах реконструкции, что важно как для понимания логики реконструкции, так и для дальнейшего совершенствования реконструктивных процедур.

При представлении объекта «структурой» такого рода анализ затруднен, поскольку нельзя сказать, что «части причинно обуславливают целое», или наоборот, что «целое обуславливает части». Иначе говоря, классический, односторонне направленный принцип причинности здесь не работает, и адекватное описание данной ситуации требует привлечения принципа дополненности.

Данная ситуация типична при решении синтетических проблем и при описании «самоидентичных» объектов (систем), для которых характерно единство сохранения и изменения. Такие системы являются двухуровневыми. Все изменения в них происходят на уровне «субстрата» или «элементной базы». При описании системы возникают две взаимно-дополнительные «логики» — «с точки зрения субстрата» и «с точки зрения структуры». Они не противоречат друг другу, но и не вытекают одна из другой. При представлении объекта его функциональными свойствами (что типично для науки и техники) структурный уровень выступает на первый план.

Согласно классическому принципу причинности «будущее не влияет на прошлое» и «событие-причина предшествует по времени событию-следствию». Это резко расходится со структурным описанием объектов, которое принципиально «синхронистично» т.е. не эволюционно. (Законы классической механики, например, образуют структуру, которая «вне времени» Если в них входит параметр «время», то

он характеризует изменчивость феноменов, ими регулируемых, но никак не самих законов).

Тем не менее, для описания переходов системы из одного структурного состояния в другое (с другими инвариантами), например, при фазовых превращениях, в результате воздействия какого-то внешнего фактора классический принцип причинности вполне корректен. При этом он должен быть адаптирован к функциональным особенностям исследуемого класса систем. Поэтому задачей данной работы является также исследование и развитие его специфических версий как для описания структурных преобразований исследуемых объектов, так и для формирования представляющих эти объекты изображений под воздействием определенных факторов.

Некорректные задачи реконструктивной вычислительной диагностики теоретико-групповой статистический подход к их решению

Решение обратной задачи (в особенности некорректной, что типично для реконструктивной вычислительной диагностики (РВД)) требует гипотетических субъективных предположений A_S и проверки их согласованности с объективными опытными данными A_O об объекте исследования. Природа гипотез A_S может быть различной; обычно они трактуются упрощенно как дополнительная «априорная информация», необходимая для регуляризации и решения задачи. Тем не менее, смысл A_S глубже. По Лейбницу A_O и A_S это «истины факта» и «истины разума» («vérité de fait» и «vérités de raison»). Решение достигается при их согласованности. Предположения A_S это прежде всего «интегрирующая идея», без которой задача не может быть решена даже при всей полноте исходных данных т.е. ее появление не есть прерогатива «некорректных» задач, а характерно для всех без исключения обратных задач

Следует отметить взаимную дополненность A_O и A_S . Будет неверным утверждать, что « A_O есть причина появления A_S », тем более, что « A_S есть причина появления A_O ». Логического пути от A_O к A_S не существует (иначе это была бы прямая, а не обратная задача), как нет универсального алгоритма делать научные открытия.

В некорректных задачах взаимная дополненность A_O и A_S проявляется уже совершенно наглядно. Поскольку решение достигается в рамках «субъект-объектного

единства», может быть множество конкретных и правильных решений (естественно также, постановок и регуляризаций) задачи на фактическом материале A_0 , иными словами, некорректная задача многоаспектна. Возникшая корректная задача это уже факты вместе с их «интерпретацией» A_S . В некорректной задаче ни одна из интерпретаций не в состоянии перечеркнуть всей совокупности других корректных интерпретаций. В прагматическом плане это предоставляет интересные возможности. Вычленив из широкого «семантического спектра» объекта определенные аспекты на основе гипотез A_S , исследователь может сосредоточиться только на релевантных (относящихся к делу) аспектах. Дефектоскописта, например, интересуют не какие-нибудь абстрактные особенности «внутреннего строения» объекта контроля, а его карта дефектности.

Естественно, выдвинутые гипотезы A_S могут быть и неверными, поэтому проверка согласованности A_0 и A_S – обязательный этап решения задачи. Математическая модель для нее может быть как детерминистской так и статистической, однако, при попытке ее решения на основе чисто детерминистского («жесткого») [3,2] подхода A_0 и A_S оказываются, как правило, несовместными, а при их совместности предположения A_S малоинформативными.

В задачах РВД практически любая плодотворная «интегрирующая идея» может быть сформулирована на языке структурного подхода. Существует большая свобода в выборе конкретного математического инструментария, обслуживающего ту или иную структурную модель. Тем не менее, структурное описание объектов (как абстрактных, так и конкретных) самым тесным образом связано с наличием в них внутренней симметрии. Математически, преобразования симметрии образуют группу [1]. Поэтому использование теоретико-группового аппарата в структурных моделях является естественным и традиционным, позволяя к тому же в широких пределах унифицировать и сам процесс формирования гипотез A_S .

Развитый авторами теоретико-групповой статистический подход [4,5,6] к реконструкции объектов по их фрагментарным и зашумленным изображениям основан на проверке гипотезы о том, является ли некоторая группа G_S группой автоморфизмов объекта, а также на оценке степени отклонения результатов проверки от условий этой «нулевой» гипотезы. Вышесказанное представляет собой ядро и общий элемент всех конкретных методов, разработанных на основе данного подхода. Сближение теоретико-групповых и статистических методов позволило преодолеть «жесткость» классического теоретико-группового анализа и приспособить его аппарат для решения синтетических задач.

Разработанные методы проверки теоретико-групповых статистических гипотез основаны на оценке степени совместности «внутренних ракурсов» объекта, возникающих за счет теоретико-групповых операций. Для этой цели конструируются множественные «меры сходства», а также «меры различия», являющиеся мерами отклонения от условий нулевой статистической гипотезы. По сути дела, они являются количественными оценками разницы между симметрией гипотетической группы G_S и симметрией реального исходного изображения.

На этих же методах статистической оценки основаны и алгоритмы пространственной фильтрации изображений с локальной группой Ли L_S , определяющей фон итогового изображения [5,6]. Отличия в том, что в данном случае они применяются к локальным микроизображениям внутри скользящего окна. Интенсивность итогового изображения для его элемента, соответствующего центральному элементу окна, строится на оценке взаимодействия микроизображения с теоретико-групповым фильтром как степени понижения симметрии микроизображения в сравнении с симметрией фона.

Причинно-следственные связи в структурно-ориентированных алгоритмах обработки изображений

Вовлечение системы во взаимодействие с какими-то другими системами и вызванное этим понижение симметрии ведет к повышению степени подробности ее описания, которое становится «более детерминистским». Статистический же подход к системе приводит к появлению дополнительных виртуальных симметрий и соответствующих им классов эквивалентности состояний в конфигурационном пространстве системы и, как следствие, в переходе к «вырожденному» описанию с пониженной степенью подробности. В связи с этим для уяснения процесса формирования изображения в структурно-ориентированных методах, уместно провести параллель между ним и такими явлениями, как вырождение и снятие вырождения в квантовой физике, где данная концепция разработана наиболее полно. Вырождение состоит в том, что некоторая физическая величина, например энергия, имеет одно и то же значение для различных состояний системы, причем вырожденному состоянию присуща более высокая симметрия чем невырожденному.

Если с этих позиций подходить к формированию изображения в алгоритмах пространственной фильтрации с локальной группой L_S [6], то фон на фильтрованном изображении представляет массив оценок для «вырожденных» и «неразличимых» состояний локальных микроизображений в скользящем окне,

характеризуемых одним и тем же (т.е. нулевым) значением статистики F (являющейся мерой для оценки разницы между симметрией группы L_S и симметрией реального микроизображения в скользящем окне). Эти микроизображения, будучи в общем случае различными, тем не менее, удовлетворяют симметрии L_S и поэтому эквивалентны.

Снятие вырождения для физической системы происходит при «включении» дополнительных взаимодействий с понижением ее симметрии. (Хрестоматийные примеры – эффект Зеемана и эффект Штарка с понижением сферической симметрии атома до аксиальной и с расщеплением спектральных линий). «Снятие вырождения» для локального микроизображения происходит, когда нарушаются условия локальной симметрии L_S , регулируемые статистикой F . Это приводит и к своеобразному «расщеплению» характеристик микроизображения по фактору, индексирующему элемент группы L_S , вернее ее конечной подгруппы. (Например, когда в роли L_S выступает $SO(2)$ и проверяется гипотеза об изотропии микроизображения в локальном пятне, то при значимой анизотропии его одномерные радоновские проекции становятся различными, перестают быть «кабелевскими»). Статистика F (скажем, статистика Фишера если проверка нулевой гипотезы основана на дисперсионном анализе) служит общей мерой «расщепленности» такого рода характеристик.

Связь между взаимодействиями, в которые вовлекается система, и понижением ее симметрии прослежена еще П.Кюри. Согласно *принципу Кюри* (1894 г.) симметрия причины сохраняется в симметрии следствий. Это «короткая формулировка» принципа, обычно приводимая в словарях и энциклопедиях. Вообще же, Кюри утверждал следующее: «*Когда какие-либо причины порождают некоторые эффекты, элементы симметрии причин должны обнаруживаться в этих эффектах. Когда какие-либо эффекты проявляют некоторую диссимметрию, то эта диссимметрия должна обнаруживаться в причинах, их породивших. Положения, обратные этим двум несправедливы, по крайней мере практически, т.е. эффекты могут быть более симметричными, чем причины, породившие их*» (Curie P., Journ. de Phys., 1894 (III), 3, 393).

Здесь им сформулирован симметрический аспект классического принципа причинности, подвергнутого ревизии в квантовой теории и дополненного условием *микрочинности*. Классический принцип причинности не выдерживает критики, когда дело касается *индивидуального восприятия времени*, и вообще не применим к явлениям духовного мира. Обычно он дает сбой при редукционистских трактовках многоуровневых систем с позиций одного лишь

«субстрата». Тем не менее, он остается справедливым для широчайшего круга явлений и подтвержден длительной человеческой практикой. При исследовании достаточно сложной реальности на «неэлементарном» уровне появляются его «интегральные» формулировки, какой по сути дела является и принцип Кюри.

В соответствии с принципом Кюри, если имеется какая-то система, подвергающаяся воздействию, то симметрия результата воздействия будет описываться группой, являющейся теоретико-множественным пересечением групп симметрии системы и воздействия (что согласуется с более поздней концепцией «снятия вырождения»). Полезно сравнить это с *принципом Ле Шателье – Брауна*, согласно которому внешнее воздействие, выводящее систему из состояния термодинамического равновесия, вызывает в ней процессы, стремящиеся ослабить эффект воздействия. В принципе Кюри также прослеживается определенное «сопротивление» системы воздействию, однако осуществляется оно одним из наиболее простых из возможных путей. Явления, в которых группы симметрии системы и воздействия совпадают, или совпадение лишь в допустимых пределах искажено шумами, уместно называть морфологическим резонансом. В методах структурно-ориентированной фильтрации он выступает в форме «пространственного резонанса».

Симметрия изображения, формируемого в измерительных трактах системы реконструктивной вычислительной диагностики, определяется группой, являющейся пересечением групп симметрии объекта контроля и определенного физического воздействия на него. Это же справедливо и относительно поступившего на вход рассмотренного здесь теоретико-группового фильтра локального микроизображения, которое уже само рассматривается как «вторичное» воздействие на анализирующую систему фильтра, причем анализ также регулируется принципом Кюри. Фильтр «зануляет» все воздействия с симметрией выше или равной L_S , пропуская только те, у которых она ниже L_S , и оценивая их нелинейной мерой F . Согласно принципу Кюри, если диссимметрия данным способом обнаружена, то независимо от L_S ее «причина» действительно содержится как в микроизображении, так и в объекте контроля, т.е. метод диагностики является объективным. Этот вывод не изменится и в том случае, если вместо L_S использовать какую-либо ее конечную подгруппу.

Результаты и выводы

Исследованы симметрические аспекты причинно-следственных связей в теоретико-групповых фильтрах для обработки изображений. На основе статистических «мер сходства» и «мер

различия» разработаны процедуры выявления скрытой симметрии или диссимметрии в объектах контроля по их исходным изображениям. Рассмотрены статистические теоретико-групповые алгоритмы пространственной фильтрации изображений с локальной группой Ли, определяющей фон итогового изображения, а также исследованы процедуры формирования итогового изображения в этих алгоритмах на основе статистической оценке понижения симметрии в скользящем окне (центральный элемент окна соответствует элементу итогового изображения) в сравнении с симметрией фона. При выявлении скрытой диссимметрии в теоретико-групповых статистических фильтрах замена группы Ли конечной группой с порядком ниже допустимого может приводить к ошибкам 1-ого рода, тогда как за ошибка 2-ого рода главным образом, зависит от размеров окна.

Разработанные алгоритмы успешно применяются в неразрушающем контроле. Они особенно полезны для выделения в объекте контроля «смысловых слоев», для каждого из которых характерна своя группа преобразований, поскольку взаимодействие между системами приводит к тому, что симметрия в природе практически всегда встречается только «в смеси» с другими симметриями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вейль Г., Классические группы, их инварианты и представления. // М.: Иностранная литература, 1947 – 408 с
2. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа // М: Наука, 1981 . – 487 с.
3. Бордовский Г. А., Кондратьев А.С., Чоудери А.Д.Р. Физические основы математического моделирования // М: Академия, 2005 . – 320 с.
4. Ewert U., Baranov V., Borchard K. Cross-sectional imaging of building elements by new non-linear tomosynthesis technique using imaging plates and Co^{60} radiation // NDT & E International, Elsevier Science Ltd. – 1997. – V. 30. – № 4. – P. 243–248.
5. Баранов В.А., Бразовский В.В., Эверт У., Редмер Б. Структурно-ориентированная визуализация зон образования трещин в компонентах атомных электростанций // Естественные и технические науки, № 5, 2010, стр. 386-391.
6. Баранов В.А., Бразовский В.В., Ивженко О.О., Эверт У. Структурно-ориентированный подход к обработке изображений // Естественные и технические науки, № 5, 2010, стр. 407-413.

АЛГОРИТМ ПОЛУЧЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ШКАЛЫ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПОВЕРКЕ СТРЕЛОЧНЫХ ПРИБОРОВ

Свинолупов Ю.Г., Кулешов В.К., Корнев В.А. Учайкина Е.С.

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: sjg@manotom-tmz.ru

Современный подход к решению проблем автоматизации поверки стрелочных приборов предполагает построение поверочных комплексов в виде объединённых с помощью интерфейсов программно управляемых калибраторов эталонных сигналов, средств технического зрения и прикладного программного обеспечения, компьютера с другими внешними устройствами для распознавания показаний и управления процессом поверки. Поэтому систему распознавания в данном случае следует рассматривать, как часть измерительного процесса, а качество распознавания в полной мере определяет точность измерения. Алгоритмическое обеспечение измерительной системы, содержащей аппаратно-программный блок распознавания изображения и обеспечивающий съём показаний со шкал стрелочных приборов, строится на концепции обучающих систем.

Значение всех необходимых для эксплуатации комплекса параметров, обеспечивающих достижение требуемых метрологических характеристик, определяются в специальном режиме предварительного обучения. На первом этапе в диалоговом режиме для определенного типа приборов вносится априорная информация, такая как класс точности поверяемого прибора или число поверяемых отметок; формируются данные о шкале прибора. На втором этапе итерационным методом определяются значения параметров алгоритма распознавания стрелочного указателя и оцифрованной отметки (объем вводимого кадра, пороговые значения

бинаризации видеосигнала, число последовательных вводов изображения, коэффициент корреляции распределенной статистики координат стрелочного указателя, статистические и геометрические параметры фрагмента оцифрованной отметки и др.). Заключительным этапом обучения для приборов с типовыми шкалами является формирования уравнения шкалы в виде кусочно-линейного аппроксиманта. Результатом обучения становится достижение измерительной системой характеристик, рассчитанных от класса точности поверяемого прибора с учетом метрологического запаса. Качество обучения учитывается на этапах экспериментального определения систематической составляющей погрешности, оценки среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности и контрольной поверки, являющихся последним звеном итерационного процесса обучения.

Целью данного алгоритма (рис.1) является формирование уравнения шкалы поверяемого прибора в виде аппроксимирующего полинома F степени n на основе обучающей последовательности $\{(\varphi_0, A_0), \dots, (\varphi_k, A_k)\}$, где φ_i – углы наклона указателя при воздействии i -го сигнала, A_i – расчётное значение i -го сигнала. Для получения уравнения шкалы используется комбинированный метод, который включает в себя: метод аппроксимации, метод кусочно-нелинейной интерполяции и метод кусочно-линейной интерполяции.

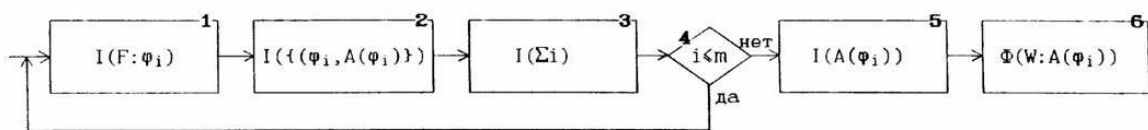


Рис. 1. Алгоритм формирования уравнения шкалы

Согласно теореме о существовании и единственности интерполяционного полинома $F(\varphi_i)=A_i$ [3] все виды интерполяции должны давать одинаковый результат и критериями выбора являются удобство представления формулы в компьютере и скорость вычислений.

Интерполяционный полином Лагранжа при произвольном расположении узлов в общем виде записывается в виде:

$$L_n(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_2)\dots(x-x_n)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)\dots(x_0-x_n)}y_0 + \frac{(x-x_0)(x-x_2)\dots(x-x_n)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)\dots(x_1-x_n)}y_1 + \dots + \frac{(x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_{n-1})}{(x_n-x_0)(x_n-x_1)\dots(x_n-x_{n-1})}y_n \quad (1)$$

При большом числе узлов удобнее находить значения функции непосредственно по формуле (1), не получая полином в явном виде, однако это приводит к большому количеству арифметических

операций, что снижает производительность поверки. Предпочтительней является интерполяция по методу Эйткена, [2] при котором значение функции $F(\varphi)$ вычисляется без явного построения интерполяционного полинома путём последовательного применения формул линейной интерполяции:

$$F_{0,1}(\varphi) = \frac{1}{\varphi_1 - \varphi_0} \begin{vmatrix} A_0 & \varphi_0 - \varphi \\ A_1 & \varphi_1 - \varphi \end{vmatrix} \quad (2)$$

$$F_{1,2}(\varphi) = \frac{1}{\varphi_2 - \varphi_0} \begin{vmatrix} A_1 & \varphi_1 - \varphi \\ A_2 & \varphi_2 - \varphi \end{vmatrix} \quad (3)$$

$$F_{0,1,2}(\varphi) = \frac{1}{\varphi_2 - \varphi_0} \begin{vmatrix} F_{0,1}(\varphi) & \varphi_0 - \varphi \\ F_{0,2}(\varphi) & \varphi_2 - \varphi \end{vmatrix} \quad (4)$$

Для n точек обучения общая формула интерполяции будет выглядеть следующим образом:

$$F_{0,1,\dots,n}(\varphi) = \frac{1}{\varphi_n - \varphi_0} \begin{vmatrix} F_{0,1,\dots,n-1}(\varphi) & \varphi_0 - \varphi \\ F_{0,1,\dots,n}(\varphi) & \varphi_n - \varphi \end{vmatrix} \quad (5)$$

Показания прибора вычисляются следующим образом: после подачи i -го входного сигнала указатель поворачивается на угол φ_i , определяется интервал интерполяции $[\varphi_{k-1}, \varphi_k]$, которому принадлежит φ_i и вычисляется $F_{0,1,\dots,k}(\varphi)$ путём последовательного применения формул (2 – 4).

Достоинствами кусочно-линейной интерполяции является то, что с ростом количества узлов погрешность интерполяции монотонно стремится к нулю и вычисление значения $F(\varphi)$ для любого интервала производится по одним и тем же простым формулам. Первое обстоятельство позволяет в итерационной процедуре (6) увеличивать количество узлов не произвольно, а на основе зависимости, полученной после первых итераций. Второе обстоятельство способствует уменьшению исходного кода программы и времени расчёта.

$$F(\varphi) = a_0 + a_1\varphi + a_2\varphi^2 + a_3\varphi^3$$

$$N=1$$

$$\sigma_{сис} = \sqrt{1/N \cdot \sum (A_i - F_i(\varphi))^2}$$

$$\text{если } (\sigma_{сис} > \sigma_{сиспр}) F(\varphi) = a_0 + a_1\varphi \quad (6)$$

$$N=2$$

$$\sigma_{сис} = \sqrt{1/N \cdot \sum (A_i - F_i(\varphi))^2}$$

$$\text{если } ((N \neq N_{омл}) \& (\sigma_{сис} > \sigma_{сиспр})) N=N-2$$

$$F(\varphi) = a_0 + a_1\varphi + a_2\varphi^2$$

Наряду с определением количества узлов интерполяции немаловажно значение имеет закон их расположения. Равномерное расположение нецелесообразно, потому что при поверке указатель занимает положение вблизи

оцифрованной отметки и именно на этом отрезке необходимо обеспечить наибольшую точность вычислений, что при равномерном разбиении приведёт к нерациональному увеличению узлов между отметками. Наиболее целесообразно, как показала практика, проводить обучение на всех поверяемых точках и на точках, отстоящих от них на $\pm \Delta$, где Δ - предельно допустимая приведённая погрешность прибора. В этом случае систематическая погрешности расчёта показаний будет минимальной в окрестности поверяемой точки, где наиболее вероятно находится указатель, а в случае выхода указателя из данной зоны прибор считается забракованным и нет необходимости с максимальной точностью рассчитывать погрешность.

После обучения уравнение шкалы в виде полинома или множества коэффициентов записывается в память, как параметр $\{V_g\}$ вектора

α . Таким образом, обучаясь на разных приборах, можно создать базу данных, в которой хранится информация о шкалах и при поверке только выбирать соответствующее уравнение, минуя операцию обучения. СЛСА [1] получения уравнения шкалы выглядит следующим образом:

$$\Phi(B) I(F: \varphi_i) I(\{\varphi_i, A(\varphi_i)\})$$

$$I(\sum i) \omega(i > m) \quad (7)$$

$$I(A(\varphi_i)) \Phi(W: A(\varphi_i)) \Phi(E)$$

Вышесказанное относится к приборам, имеющим стандартную шкалу. Для того чтобы поверять прибор с индивидуальной шкалой, необходимо изменить алгоритм следующим образом, представленный на рисунке 2. По сути третий этап алгоритма обучения – предварительный расчёт уравнения шкалы и запись его в память ЭВМ, исчезает, а уравнение шкалы создаётся непосредственно в процессе поверки. На обучении можно предварительно выбрать степень аппроксимирующего полинома, используя в качестве образца однотипный с поверяемым прибором.

Алгоритм обучения для приборов с индивидуальными шкалами работает следующим образом. Подавая на прибор тестовый сигнал, устанавливают указатель последовательно на все поверяемые отметки (бл.5, 6).

Вычисляют угол наклона указателя φ_i (бл.1) и на прямой, проходящей под данным углом через центр вращения (x_c, y_c) на определённом расстоянии p , устанавливают поле ввода изображения (бл.2) с целью ввода оцифрованного штриха (бл.3). Рассчитывают (бл.4) угол наклона штриха β_i по формуле (12). Этому углу соответствует значение по шкале прибора $A(\beta)$.

Сформировав массив секторов, содержащих все оцифрованные отметки (бл.2), создают массив окон ввода изображения (бл.3) и заносят

координаты окон в блок ввода изображения, имеющий внутренний адрес Ad*. Для этого координаты преобразовываются в декартовые координаты по следующим формулам:

$$x_1 = x_c - (\rho - \Delta\rho) \cdot \sin(\varphi - \Delta\varphi), \quad (8)$$

$$x_2 = x_c - (\rho + \Delta\rho) \cdot \sin(\varphi + \Delta\varphi), \quad (9)$$

$$y_1 = y_c - (\rho - \Delta\rho) \cdot \cos(\varphi + \Delta\varphi), \quad (10)$$

$$y_2 = y_c - (\rho + \Delta\rho) \cdot \cos(\varphi - \Delta\varphi). \quad (11)$$

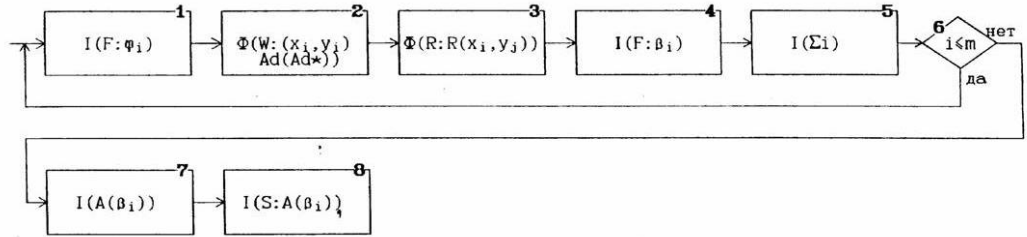


Рис. 2. Алгоритм проверки прибора с индивидуальной шкалой

Формулы (8-11), устанавливая поле ввода изображения (бл.2) с целью ввода оцифрованного штриха (бл.3). Рассчитывают (бл.4) угол наклона штриха β_i используя следующую процедуру. Сканирование проводится внутри сектора $\{\varphi \pm \Delta\varphi, \rho \pm \Delta\rho\}$ с шагом $\Delta\varphi_{скан}$, а полярные координаты точек изображения определяются по формулам:

$$\rho_k = \sqrt{(x_c - x_k)^2 + (y_c - y_k)^2}, \quad (12)$$

$$\varphi_k = \arctg \left[\frac{y_c - y_k}{x_c - x_k} \right] \quad (13)$$

В результате сканирования формируется закон распределения информативных элементов изображения:

$$N_{\varphi_i} = \left\{ \sum R(x_k, y_k), \varphi_k = \varphi - \Delta\varphi + k \cdot \Delta\varphi_{скан} \right\} \quad (14)$$

За угол наклона линии, проходящей через центр вращения указателя и оцифрованный штрих принимается угол $\varphi_{отм_i}$ с максимальной суммой информативных элементов изображения.

$$\varphi_{отм_i} = \left\{ \varphi_i : \max \sum N_{\varphi_i} \right\} \quad (15)$$

Этому углу соответствует значение по шкале прибора $A(\beta)_i$. Табличная функция будет иметь вид $\{(\varphi_0, A(\beta)_0), \dots, (\varphi_k, A(\beta)_k)\}$. Далее расчёт уравнения шкалы и показаний прибора ведётся аналогично варианту для стандартной шкалы (бл.7). Полученное уравнение индивидуально для каждого прибора.

СЛСА получения уравнения штриха (16) и обучения (17) запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} & \Phi(B) I(x_i, y_i \rightarrow \rho, \Delta\rho, \varphi, \Delta\varphi) \Phi(R: \rho_i, \varphi_i) \\ & I(\rho_i, \varphi_i \rightarrow x_i, y_i) \times \\ & \times \Phi(W: (x_i, y_i) Ad(Ad*)) \Phi(R: R(x_i, y_j)) \\ & I(\varphi_k = \arctg((y_c - y_k)/(x_c - x_k))) \times \\ & \times I(\sum i, \Delta\varphi) \omega(\varphi_k + \Delta\varphi < \varphi_k < \varphi_k - \Delta\varphi) \\ & \omega(i > m) \Phi(S: \{\varphi_i\}) \Phi(E) \quad (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \Phi(B) I(F: \varphi_i) \Phi(W: (x_i, y_i) Ad(Ad*)) \times \\ & \times \Phi(R: R(x_i, y_j)) I(F: \beta_i) \quad (17) \\ & \times I(\sum i) \omega(i > m) I(A(\beta_i)) \times \\ & \times I(S: A(\beta_i)) \Phi(E) \end{aligned}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование.: Учеб. пособие для вузов. -2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 439с.
2. Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. Численные методы. Изд-во "Лаборатория базовых знаний". 2003.
3. Методы вычислений на ЭВМ: Справочное пособие / Иванов В.В. -Киев: Наукова думка, 1986. - 584с.

ДИАГНОСТИКА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

Юрченко А.В., Китаева М.В., Козлов А.В., Охорзина А.В.

Томский политехнический университет, Томск, пр. Ленина, 30, Россия.

E-mail: niipp@inbox.ru

С 1996 г. в Томске создана уникальная экспериментальная база для проведения полевых испытаний солнечных энергетических систем, в состав которой входят: TOR-станция контроля параметров атмосферы, мобильная станция мониторинга работы солнечных батарей, демонстрационная зона работы 240 Вт солнечного энергетического комплекса, лабораторные испытательные стенды. На базе 12 летних натурных испытаний кремниевых солнечных батарей мощностью от 5 до 650 Вт, проведенных в Сибири и на Дальнем Востоке, построена адекватная физико-математическая модель работы кремниевых солнечных батарей под воздействием климатических и аппаратных факторов.

В связи с тем, что стоимость традиционных источников энергии стремительно растет, в регионах без стационарной сети электропитания вместо дизель - электрогенераторов все чаще применяют солнечные энергетические установки (СЭУ) [1]. Это позволяет не только снизить экологическую нагрузку на экосферу, но и выгодно с экономической точки зрения. Так, например, в Приморском крае на удаленной ретрансляционной станции для электропитания используют дизель-генератор, для которого периодически поставляют топливо. Итоговая себестоимость электроэнергии составляет 11 руб./кВт.ч. В тоже время при установке СЭУ мощностью 200 Вт себестоимость электроэнергии составит 7 руб./кВтч при расчете на 10 летний срок службы системы.

Таким образом, исследование работы и прогноз использования СЭУ и фотоэлектрических модулей (ФМ) в регионах Сибири и Дальнего Востока являются актуальной научной задачей.

В отличие от традиционных источников энергии, работа СЭУ зависит от многих факторов:

- аппаратных, обусловленных конструкцией и технологией изготовления ФМ, углом размещения по отношению к горизонту;
- климатических, обусловленных воздействием различных климатических параметров на выходные энергетические характеристики ФМ; к таким факторам можно отнести солнечную радиацию, температуру воздуха, влажность, скорость ветра, концентрация аэрозолей.

Однако при расчете конструкции для местности, где планируется использовать СЭУ, недостаточно учитываются климатические особенности региона, а также аппаратные факторы, обусловленные ее использованием. Для

решения данной задачи необходимо разработать модель работы ФМ с учетом воздействия доминирующих климатических и аппаратных факторов, а также провести натурные испытания СЭУ при одновременном мониторинге параметров атмосферы и характеристик элементов СЭУ.

В период с 1996-2003 гг ФМ была подключена к одному из цифровых каналов TOR-станции мониторинга атмосферных параметров и установлена на её крыше под углом 45 градусов к горизонту, ориентирована на расположение солнца в два часа дня. Контрольный параметр – напряжение на этой нагрузке. Ток солнечной батареи создал на нагрузке 5 Ом при освещении 1000 Вт/м² (AM1.5) и температуре 25°C, напряжение около 4 В. Напряжение холостого хода исследуемой батареи при этих же условиях составляло 21 В. В результате проведенного мониторинга была собрана база данных, состоящая из следующих параметров: метеопараметры, газовый и аэрозольный состав атмосферы, ток КЗ ФМ.

Из 38 параметров, измеряемых TOR станцией и характеризующих состояние атмосферы по величине коэффициента корреляции $K_s \geq 0.3$, на работу ФМ в натуральных условиях влияют солнечная радиация ($K_s = 0.9$), влажность (-0.44), температура (0.3). Заметим, что в этом эксперименте не измерялась вольт-амперная характеристика (ВАХ)..

Солнечная радиация. Преобразование энергии в ФМ основано на фотовольтаическом эффекте в неоднородных полупроводниковых структурах при воздействии на них солнечного излучения. В отличие от других источников тока характеристики солнечного элемента зависят от количества падающего на его поверхность света. Например, набежавшее облако может снизить выходную мощность более чем на 50%. На выходные параметры ФМ будет влиять не только суммарная солнечная радиация, но и положение солнца на небосводе. Чем ближе положение солнца к зенитному положению, тем больший ток будет вырабатывать ФМ, но при этом произойдет и более сильный разогрев рабочей поверхности ФМ.

Температура воздуха и скорость ветра. При работе ФМ без охлаждения в ней выделяется большое количество тепловой энергии, и рабочая температура возрастает. Значительное повышение температуры влияет на концентрацию носителей заряда, а также на процесс поглощения света, в результате чего изменяются выходные параметры

ФМ. Понятно, что рабочая температура ФМ будет зависеть от температуры окружающего воздуха. Следует отметить влияние скорости ветра, который может служить естественной конвекцией. Поэтому при разработке модели необходимо учитывать этот параметр.

Влажность и давление воздуха. Влажность воздуха влияет на параметры ФМ, во-первых, потому, что одна из полос поглощения водяного пара лежит в спектральной области работы ФМ; во-вторых, влажность может влиять на процессы теплообмена между ФМ и окружающей средой.

Вольтамперная характеристика ФМ. Напряжение холостого хода, генерируемое одним ФМ, слегка изменяется при переходе от одного ФМ к другому в одной партии, от одной фирмы изготовителя к другой. Эта величина не зависит от размеров ФМ. Иначе обстоит дело с током, зависящим от интенсивности света и размера ФМ, под которым подразумевается площадь его поверхности.

Поскольку условия предыдущего эксперимента не позволили оценить влияние температуры, влажности, давления воздуха, а также скорости ветра на ВАХ ФМ, в частности, на такие важные характеристики, как напряжение холостого хода и максимальную мощность, то для дальнейшего проведения исследований была разработана мобильная станция мониторинга работы ФМ. Она позволяет измерять вольтамперную характеристику ФМ, температуру рабочей поверхности ФМ, температуру, влажность и давление воздуха.

Мобильная станция мониторинга работы ФМ содержит эквивалент нагрузки, блок управления, средства для измерения параметров учитывающих климатические факторы, а также, датчик температуры рабочей поверхности солнечной батареи, средства для измерения суммарной солнечной радиации. При этом эквивалент нагрузки и все упомянутые измерительные средства соединены с блоком управления, а эквивалент нагрузки имеет вход для соединения его с исследуемой солнечной батареей.

При преобразовании солнечного излучения (особенно при высоких уровнях солнечной радиации) в ФМ выделяется некоторое количество тепла, и рабочая поверхность может нагреваться до 80-100°C. Это приводит к повышенному износу параметров СЭ и снижению энергетических характеристик ФМ при их использовании. Концентрация дефектов, определяющая степень деградации параметров элемента, будет зависеть не только от плотности интегрального потока солнечной радиации, но и от рабочей температуры ФМ [1]. Поэтому необходимо изучить влияние температуры и освещенности на фотоэлектрические и радиационные характеристики кремниевых СЭ, работающих в природных условиях.

До этого момента такая процедура производилась на мобильной станции мониторинга (рис. 1).

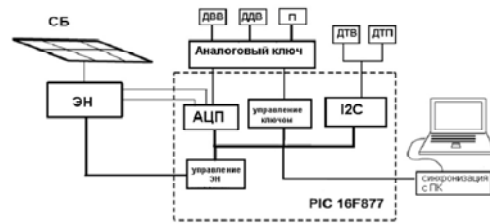


Рис. 1. Блок – схема станции мониторинга

Станция работает следующим образом. Измерения начинаются в начале каждого часа. Затем, однократно с интервалом в одну минуту, регистрируется ВАХ ФМ, ее температура, температура воздуха, а также вычисляется рабочая точка ВАХ. По истечению пятнадцати минут измерения прекращаются до начала следующего часа. В итоге одного цикла для каждого параметра набирается одномерный массив, состоящий из пятнадцати элементов. Далее массив усредняется, и полученный результат сохраняется в файл данных, причем, результаты измерения, где ток короткого замыкания ФМ меньше 0.1 А, не сохраняются. Такие значения тока короткого замыкания соответствуют сумеркам или ночной фазе суток и не представляет интереса для исследования [2].

Подобная схема реализации не позволяет измерять ВАХ при низкой освещенности. Количество точек ВАХ при $S_r \leq 300$ Вт/м² составляет 2-3 точки. Поэтому схема измерения ВАХ была модифицирована на основе магазина сопротивлений и микроконтроллера OLIMEX-LPC-P2378. Число снимаемых точек достигало 30, что позволило увеличить точность измерений.

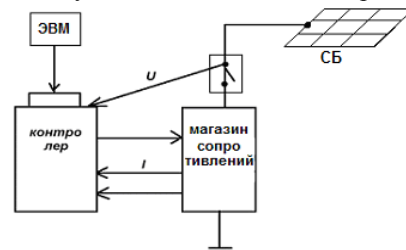


Рис. 2. Структурная схема станции мониторинга

При запуске программы подается сигнал на микроконтроллер, который подает управляющий сигнал на реле, которые подключают нагрузку. Нагрузка представляет собой магазин сопротивлений от 1 Ом до 8 кОм, что позволяет измерить ВАХ с большой точностью и определить рабочую точку (рис.3).

Управление станцией происходит при помощи программы, созданной на платформе LabVIEW (рис. 4).

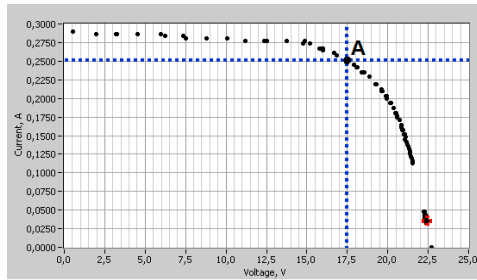


Рис. 3. Измерение ВАХ. А-рабочая точка

В левом нижнем углу окна управления программой представлено 14 переключателей, которые позволяют проводить измерения в ручную, что дает возможность наиболее точно оценивать работу ФМ.

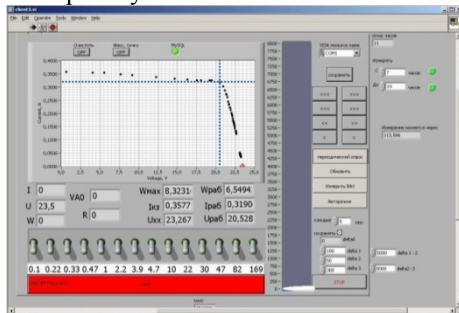


Рис. 4. Окно программы LabVIEW

Разработанная станция мониторинга совместно с TOR-станцией дает возможность измерять ВАХ ФМ, определять ее параметры и измерять основные параметры климата. Это позволяет определить эффективность работы ФМ при различных погодных условиях.

Данная станция была установлена на крыше Института оптики атмосферы РАН (г. Томск) и подключена к ФМ мощностью 25 Вт, ориентированной под углом 45° к горизонту в направлении на юг. Данные измерения автоматически регистрируются и отображаются на сайте lor.iao.ru с января 2011 года (Рис.5).

Были проведены испытания различных типов ФМ в регионах Сибири и Дальнего Востока (табл. 1).

В результате проведенных исследований с использованием мобильной станции была собрана база данных, включавшая дату, время, метеопараметры, температуру ФМ и ВАХ. С учетом данных, собранных с 1996 г., объем базы данных составил более чем 20000 записей. База данных состоит из данных, полученных в разное время года и в различных географических местах. Такое количество данных достаточно для проведения статистического анализа и построения уравнений регрессии.

Первым этапом регрессионного анализа является определение вероятностного взаимного влияния параметров друг на друга.

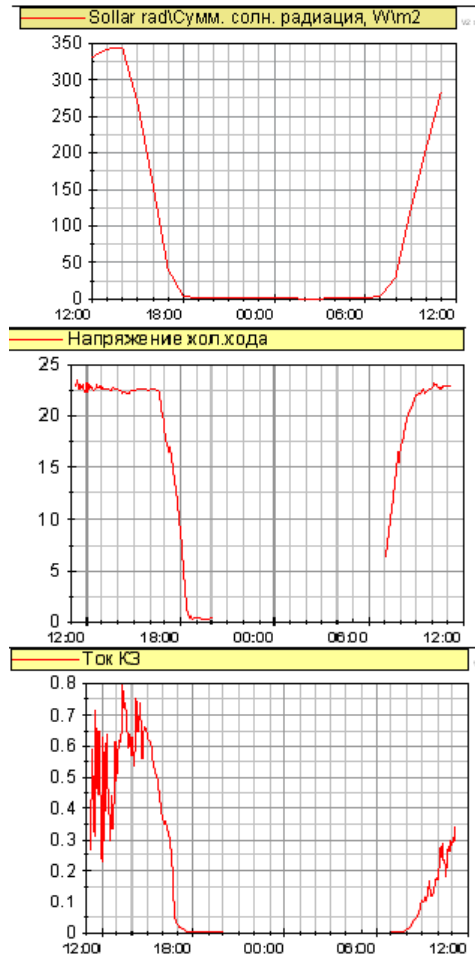


Рис. 5. Измерения станции

Для этого, используя множественный корреляционный анализ, были рассчитаны парные коэффициенты корреляции, характеризующие тесноту связи между факторами, влияющими на работу ФМ. Затем, используя парные коэффициенты корреляции, был построен граф (рис. 6), где прямыми линиями обозначены значимые парные коэффициенты корреляции.

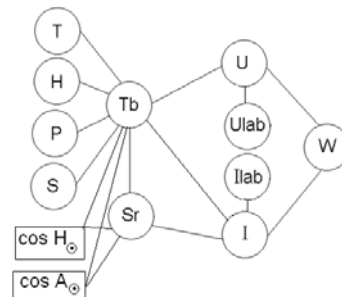


Рис. 6. Граф работы фотоэлектрических модулей: Т – температура воздуха; Н – влажность воздуха; Р – давление воздуха; S – скорость ветра; $\cos H$ – косинус угла наклона солнца над горизонтом, $\cos A$ – азимут солнца, T_b – температура фотоэлектрических модулей; S_r – солнечная радиация; U_{lab} , I_{lab} – напряжение и ток фотоэлектрических модулей, измеренные в лабораторных условиях; W – мощность, вырабатываемая фотоэлектрическими модулями

Таблица 1

Места проведения испытаний ФМ

Тип ФМ	Объем выборки	Мощность, Вт	Время испытаний	Место установки	Контролируемые параметры	Тип конструкции
ФМ-14-10	18408	10	1996-2003 гг.	Томск (ИОА СО РАН)	Ток КЗ, 38 параметров атмосферы	Триплекс
ФМ-200 «ОЛЬХОН»	253	200	Зима 2002 г.	Томск (НИИПП)	ВАХ, основные параметры атмосферы	Триплекс
ФСМ 1.5-3 «Арктика»	511	1.5	2006 г.	Томск, Новосибирск, Абакан	ВАХ, солнечная радиация, температура воздуха и ФМ	Текстолит
ФСМ 50/14	2628	25	2005-2006 гг.	Томск (ИОА СО РАН, НИИПП)	ВАХ, основные параметры атмосферы	Стекло/Пленка
ФСМ 25/14	1276	25	2005-2007 гг.	Томск, Новосибирск, о.Байкал	ВАХ, основные параметры атмосферы	Стекло/Пленка
ФСМ 25/14	373	25	2007 г.	Владивосток	ВАХ, основные параметры атмосферы	Стекло/Пленка

Используя модель [6] был проведен расчет максимальной мощности, отдаваемой в нагрузку. Результаты расчета мощности по эмпирической модели представлены на рис. 7 в виде хода расчетной и измеренной мощности ФМ.

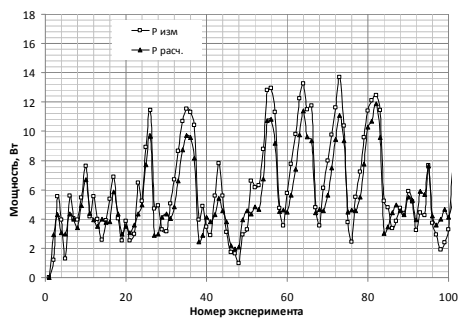


Рис. 7. Ход максимальной мощности

Для сравнения регрессионных уравнений с другими моделями были выбраны результаты измерений одного произвольно определенного дня. В этот день отсутствовала облачность, средняя температура составляла +11 °С. Были проведены расчеты выработанной энергии ФМ по различным моделям, включая предлагаемую. Также на график нанесена произведенная энергия ФМ, которая измерялась мобильной станцией. Результаты представлены на рис. 8.

Видно, что расчетная кривая практически совпадает с измеренной. Разработанные уравнения

регрессии обеспечивают погрешность расчета суммарной выработанной энергии не хуже 5%. Другие модели показали неудовлетворительные результаты.

Ошибка оценки суммарной мощности для модели КПД составила 32%, а для модели поправочных коэффициентов 15%.

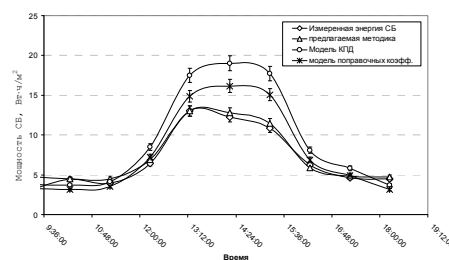


Рис. 8. Проверка моделей расчета выработанной энергии

Таким образом, задача построения статистической модели выработанной энергии ФМ выполнена. Для использования этой модели при проектировании ФЭС необходимо усовершенствовать методику определения параметров ФМ в лабораторных условиях. Обычно измерения напряжения холостого хода (ХХ) и тока короткого замыкания (КЗ) производят за небольшой отрезок времени – освещают ФМ, измеряют напряжение ХХ и ток КЗ, после чего испытания прекращаются. Предлагается измерять

ВАХ ФМ до тех пор, пока температура ФМ не примет максимальное значение. Это позволяет определить температуру ФМ, измеренную в лабораторных условиях, которая используется в уравнении регрессии. Кроме того, такой метод измерения позволяет уточнить температурные коэффициенты ФМ.

Используя данные суммарной солнечной радиации и метеопараметров для г. Томска, по разным моделям было рассчитано количество энергии, которое выработала ФМ в 2005 г.; на рис. 9 представлены реально измеренные данные.

Из рис. 9 видно, что предлагаемая в этой работе модель наилучшим образом прогнозирует выработку энергии ФМ в различные месяцы года. Погрешность прогноза не превысила 5 %. Суммарная мощность в период с марта по октябрь составила 160 кВт ч/м².

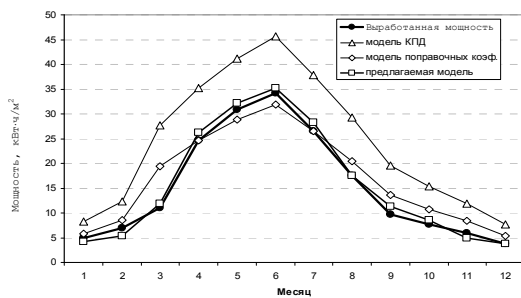


Рис. 9. Сравнение моделей

Выводы

В лабораторных условиях при стандартных значениях температуры воздуха (+25 °С) и суммарной солнечной радиации (1000 Вт/м²) производят измерения напряжения холостого хода, тока короткого замыкания, температуры ФМ, коэффициента полезного действия. Испытания продолжают до тех пор, пока температура ФМ не примет максимальное значение.

Производят анализ метеоусловий, в которых будет работать ФМ. Для этого из метеорологических справочников выбирают среднемесячные, среднесуточные значения температуры, влажности, давления воздуха, суммарную солнечную радиацию, количество солнечных дней.

Рассчитывают приходящая на ФМ суммарная солнечная радиация из условий местоположения ФМ, её угла наклона относительно горизонта, а также положения солнца на небосводе.

Используя полученные регрессионные уравнения, рассчитывают температура поверхности ФМ, напряжение холостого хода, ток короткого замыкания, рабочий ток и рабочее напряжение, а затем максимальная мощность, отдаваемая в нагрузку.

По полученным значениям делают вывод о порядке использования ФМ в данном регионе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Aberle A.G., Altermatt P.P., Heiser G., Robinson S.J., Wang A., Zhao J., Krumbeir U., Green M. Limiting loss mechanisms in 23 % efficient silicon solar cells // J. Appl. Phys. – 1995. – V. 77. – № 7. – P. 3491–3504.
2. Детинко М.В., Медведев Ю.В., Петров А.С. Физические основы неразрушающего СВЧ-резонансного метода локального контроля электрофизических параметров полупроводников. – Томск: Изд-во ТГУ, 1988. – 30 с.
3. Ахманаев В.Б., Медведев Ю.В., Петров А.С. Резонатор для бесконтактного измерения удельного сопротивления полупроводниковых материалов // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1981. – Вып. 4. – С. 48–51.
4. Медведев Ю.В., Скрыльников А.А. Бесконтактный СВЧ-резонаторный метод измерения подвижности свободных носителей заряда в полупроводниках // Известия вузов. Физика. – 1985. – Т. 38. – № 7. – С. 28–31.
5. Miyamoto N., Nishizawa J. Contactless measurement of resistivity of slices of semiconductor materials // Research institute of electrical communication. – 1967. – V. 38. – № 10. – P. 360–367.
6. Лапатин Л.Г., Петров А.С., Киселев И.И. Экспрессное определение электрофизических и рекомбинационных характеристик особо чистого германия бесконтактными методами: Препринт. – М.: ЦНИИ Атоминформ, 1986. – 28 с.
7. Мочалов И.Г., Ушеренко А.А., Юрченко А.В. Автоматизированная система измерения характеристик фотоэлектрических преобразователей // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» (Датчик-96): Тез. докл. VII научно-техн. конф. / Под ред. В.Н. Азарова. – М.: МГИЭМ, 1996. – Т. 2. – С. 404–405.
8. Ушеренко А.А., Юрченко А.В. Планарная неоднородность фоточувствительности фотоэлектрических преобразователей // Электронная промышленность. – 1998. – № 1–2. – С. 108–111.

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЕ ДИСТАНЦИОННОЕ РАДИОВИДЕНИЕ

Якубов В.П., Шипилов С.Э., Суханов Д.Я., Разинкевич А.К.

Томский государственный университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36

E-mail: shipilov@webmail.tsu.ru

Аннотация: В работе рассматривается метод восстановления изображения удаленных объектов при сверхширокополосном (СШП) импульсном зондировании с использованием аппаратной функции системы. Система представляет собой радар с синтезированной апертурой, совмещенный с параболическим зеркалом. Синтез апертуры осуществляется за счет сканирования СШП приёмопередатчиком по плоскости вблизи фокуса параболического переотражателя. Такая схема позволяет отнести границу максимального удаления зондируемого объекта на расстояние 2-3 диаметра параболического зеркала. Дополнительное преимущество схемы, содержащей параболическое зеркало (переотражатель), состоит в возможности фокусировать излучение в заданную удаленную область пространства. В подтверждение работоспособности метода представлены результаты численного и натурного моделирования.

В последнее время участились случаи использования промышленных и самодельных взрывных устройств как при проведении террористических актов, так и в локальных вооруженных конфликтах. Известны случаи перемещения таких устройств и других запрещенных предметов в ручной клади и под одеждой на территориях аэропортов, стадионов и других мест большого скопления людей. В связи с этим актуальной является задача создания высокоэффективных средств дистанционного обнаружения запрещенных устройств и предметов. По ряду причин при разработке бесконтактных средств обнаружения предпочтение должно быть отдано радиоволновым системам. Во-первых, в отличие от рентгеновского излучения, радиоволны практически полностью безвредны и не приводят к негативным последствиям для здоровья людей. Во-вторых, потенциально весьма широк спектр применений этих систем: использование в местах сосредоточения больших людских потоков, применение в ходе спецопераций для обнаружения и слежения за перемещениями людей, скрывающихся за стенами зданий, обнаружение пострадавших после чрезвычайных происшествий и т.д.

Основными частями системы для восстановления изображения удаленных на расстоянии нескольких метров объектов являются параболическое зеркало и решетка приёмопередатчиков, находящаяся в плоскости вблизи фокуса зеркала (рис. 1). Назовем такую систему комбинированной антенной.

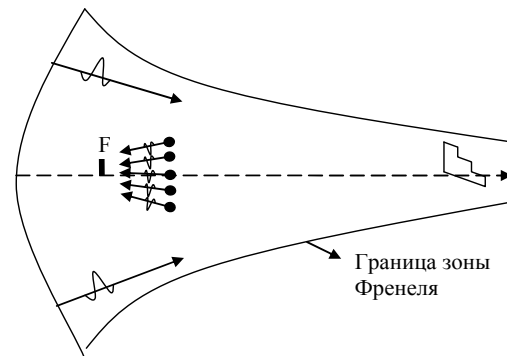


Рис. 1. Граница зоны Френеля для комбинированной антенны

Основным требованием для сканирующих систем такого типа является помещение исследуемого объекта в ближней зоне излучателя (в зоне Френеля), которая находится на расстоянии порядка размера антенны. Использование параболического зеркала в системе позволяет отдалить границу зоны Френеля, в связи с этим становится возможным исследовать более отдаленные объекты. Во избежание затенения отраженным зеркалом сигнала решеткой приёмопередатчиков, в установке использовалось несимметричное параболическое зеркало (оффсетная параболическая антенна), у которого ось симметрии не пересекается с его поверхностью.

Еще одним преимуществом использования комбинированной антенны является возможность сканирования пространства лучом сигнала при переходе от одной позиции передатчика в решетке к следующей позиции, при общей неподвижной конструкции.

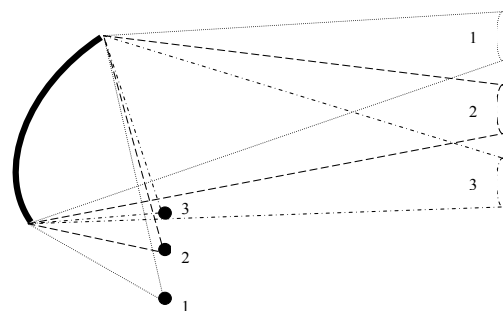


Рис. 2. Позиционное сканирование комбинированной антенной

На рис. 2 изображен принцип такого сканирования в двухмерном случае с линейной решеткой излучателей. Квадратная решетка

позволяет сканировать в большом телесном угле (по двум координатам).

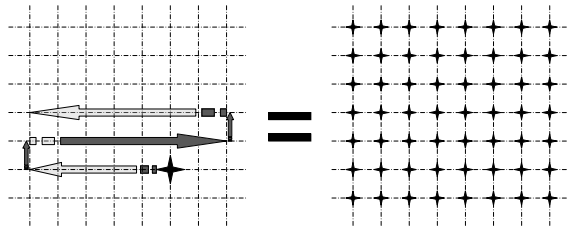


Рис. 3. Способы исполнения антенной решётки



Рис. 4. Внешний вид установки для экспериментов по сверхширокополосному радиоволновому видению удаленных объектов

Для упрощения конструкции системы, антенная решетка заменена синтезируемой апертурой, которая представляет собой один СШП приемо-передатчик, меняющий место в пространстве с заданным шагом и траекторией (рис. 3).

На рис. 3 звездочками отмечены приёмо-передатчики, стрелками обозначено движение приёмо-передающего устройства по заданным позициям решётки, иными словами, слева изображен процесс синтеза апертуры, а справа - заполненная антенная решётка. Синтез апертуры осуществляется после накопления информации со всех положений приёмо-передатчика. Синтезирование апертуры можно применять в случаях, когда быстродействие системы не является принципиально важным.

На рис. 4 показан внешний вид установки для проведения сверхширокополосной томографии удаленных объектов

Для решения обратной задачи восстановления изображения для комбинированной антенны применение метода пространственной импульсной фокусировки затруднительно. Это связано с тем, что источники вынесены из фокуса зеркала, а это означает, что в любой точке пространства форма импульса разная. Рис. 5 иллюстрирует этот эффект: слева серым изображен фронт волны, (амплитуда определяется в зависимости от интенсивности серого цвета), справа вынесены срезы фронта в разных его сечениях. Видно, что импульсы искажаются при отражении от кривой поверхности зеркала, поэтому складывать их с учетом задержек затруднительно.

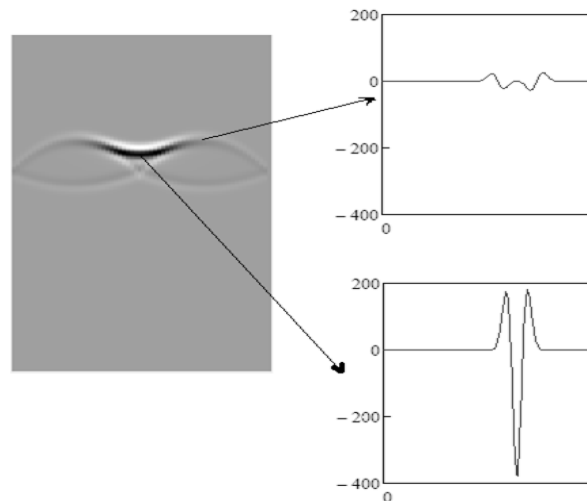


Рис. 5. Срезы фронта сигнала, отраженного от параболического зеркала

Поэтому для решения обратной задачи по рассеянному полю необходимо использовать метод аппаратных функций [1]. При достаточном объеме зарегистрированных данных и коротких зондирующих импульсах отклик на точечную

неоднородность приближается к «размазанной» δ -функции, что позволяет отождествить результаты фокусировки с распределением диэлектрической проницаемости $\Delta\epsilon$. Однако, «размазанность» δ -функции приводит к уменьшению разрешающей способности данного способа, что в свою очередь не позволяет выделять на полученном томографическом изображении детали менее пространственной протяженности зондирующего импульса. Таким образом, возникает задача устранить «размазанность» δ -функции путем привлечения некоторой априорной информации. В качестве такой информации может служить реакция (отклик) зондирующей системы на точечную неоднородность. Таким образом, для восстановления формы объекта, необходимо на разных дальностях с определенным шагом рассчитать либо измерить сигнал, рассеянный точечным объектом.

На рис. 6 приведены результаты имитационного моделирования восстановления изображения тестового объекта в виде четырех точек. Обратная задача восстановления изображения удаленного объекта численно решали при следующих условиях: синтезированную апертуру выбирали в виде квадрата со сторонами 70 см с шагом 1,1 см; офсетное параболическое зеркало радиуса 0,4 м, с фокусным расстоянием 0,6 м; решетку приемопередатчиков выносили из фокуса зеркала на 5 см. Как было отмечено выше, в качестве исследуемого образца выбирали четыре точечных объекта, помещенных на расстояние 2 м от комбинированной антенны, расстояние между точечными объектами составляло 10 см.

Для восстановления изображения этого объекта использовали точечную аппаратную функцию, рассчитанную на расстоянии двух метров от антенной решетке.

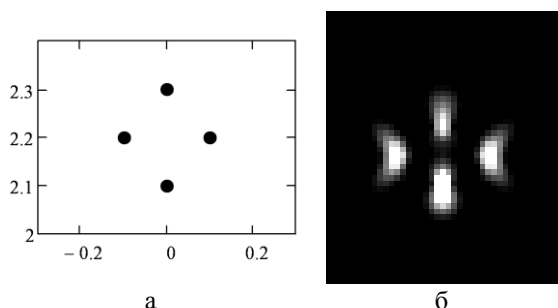


Рис. 6. Форма тестового объекта из 4 точек (а) и его радиоизображение (б)

Численное моделирование показало, что метод аппаратных функций позволяет четко различать точечные объекты, удаленные друг от друга на небольшое расстояние. Далее, на рисунке 7 б приведен результат восстановления тестового

объекта в виде ступенчатого треугольника со стороной 15 см и высотой ступеньки 5 см (рис. 7 а). Для восстановления использовали одну аппаратную функцию, расположенную в геометрическом центре объекта. На рис. 7 в приведен результат восстановления тестового объекта по данным натурального эксперимента.

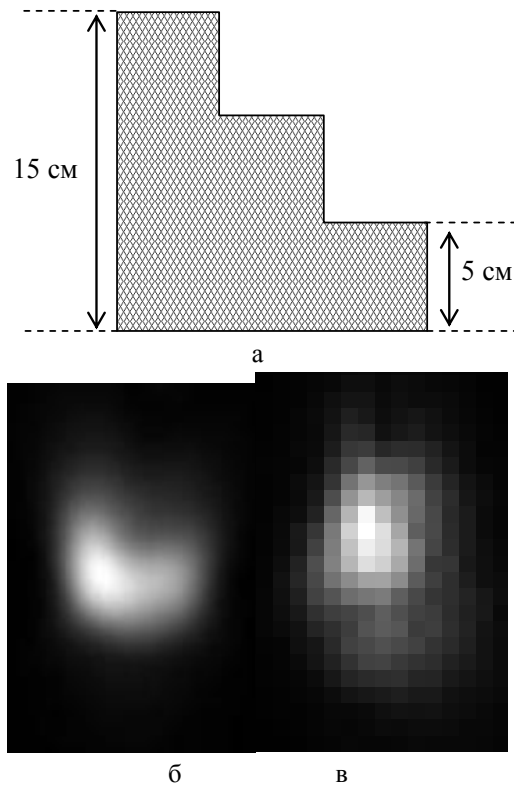


Рис. 7. Использование одной аппаратной функции для восстановления тестового объекта: форма объекта (а), результат восстановления изображения при имитационном моделировании (б) и по данным натурального эксперимента (в)

Как видно, восстановленная форма объекта существенно размыта. Данный эффект можно объяснить ярко выраженной локальностью аппаратной функции вблизи ее геометрического центра. Как показали численные эксперименты, применение точечной аппаратной функции обеспечивает высокое разрешение только вблизи своего геометрического центра в радиусе 5 см. За его пределами качество восстановления резко падает.

Для того, чтобы строить изображения крупных объектов с линейными размерами порядка нескольких десятков сантиметров, было предложено рассчитывать на каждой дальности сетку аппаратных функций (рис. 8). Путем свертки сигнала от исследуемого объекта с сигналом от каждого точечного объекта (аппаратной функции) можно построить комбинированное изображение объекта.

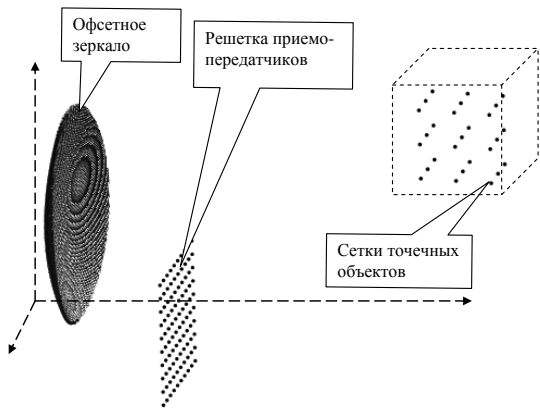


Рис. 8. Схема измерения протяженных в пространстве объектов

Для проверки эффективности такого использования аппаратных функций было проведено имитационное моделирование восстановления тестового объекта в виде ступенчатого треугольника со стороной 15 см и высотой ступеньки 5 см. Объект был удален от антенны на 2 м. Для этого же расстояния была рассчитана сетка аппаратных функций. Каждая аппаратная функция отвечала за свою область пространства. На рис. 9 а нанесена сетка с шагом 5 см, отмечающая области каждой из аппаратных функций. На этапе построения изображения происходит стыковка областей по заданным границам. На рис. 9 а для наглядности изображено частое заполнение сетки аппаратными функциями, однако возможно использование гораздо более редкой сетки без особого ущерба для качества изображения. Для реализации натурального эксперимента по распознаванию зубчатого треугольника или любого другого объекта необходимо измерить либо рассчитать при заданных параметрах системы набор аппаратных функций, удовлетворяющих условиям эксперимента.

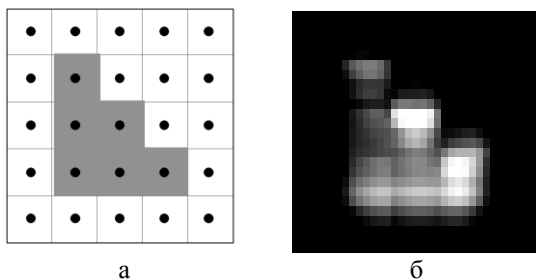


Рис. 9. Использование сетки аппаратных функций для восстановления изображения крупного объекта: сетка тестовых объектов (а) и восстановленное радиоизображение (б)

Радиоволновый сканер с комбинированной антенной использует СШП импульсный сигнал. Многочастотность сигнала позволяет разрешать

объекты не только в поперечном направлении, но и в продольном – по дальности. Для подтверждения этого был поставлен численный эксперимент. В качестве объекта для этого эксперимента выбраны все те же 4 точки, но три из них были удалены от антенны на 2 м (рис. 10 а, обозначены черными кружками), а четвертая расположена на 2,2 м (рис. 10 а, обозначена черным квадратом).

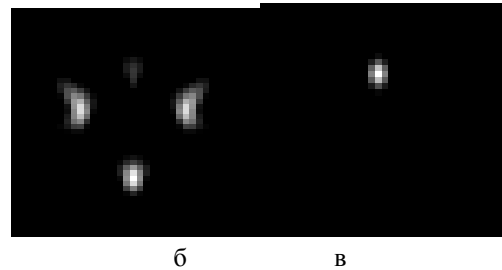
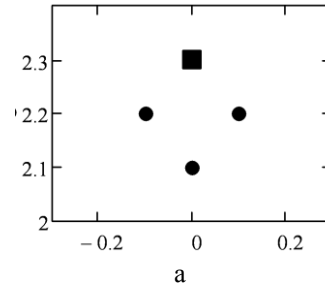


Рис. 10. Форма тестового 4-х точечного объекта (а) и его изображение на разных дальностях (б, в)

Как видно из рисунка в результате применения алгоритма восстановления радиоизображения точек, расположенных на разных дальностях, легко разделяются.

Работа выполнена при поддержке Российских программ АВИЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» мероприятие 2, проект № 2.1.2/12874, а также ФЦП в рамках мероприятий 1.1. (ГК № 14.740.11.0076), 1.2.2 (НК-104П/2) и 1.3.1 (НК-181П/6).

ЛИТЕРАТУРА

1. Якубов В.П., Склярчик К.Г., Пинчук Р.В., Суханов Д.Я., Булавинов А.Н., Бевецкий А.Д. Радиоволновая томография скрытых объектов для систем безопасности // Известия высших учебных заведений. Физика. 2008, № 10. - С. 63-79.

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ СУБЪЕКТОВ В КОНКРЕТНЫХ УСЛОВИЯХ

Учайкина Е.С., Кулешов В.К.

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: uchaikina@sibmail.com

Использовать биометрические параметры человека для идентификации личности фантасты предложили более 40 лет назад. В 1967г. Роберт Хайнлайн в своем произведении «если это будет продолжаться...» описал распознавание своего героя по узору радужной оболочки глаза, а в 1969-м Айзек Азимов в романе «Стальные пещеры» первым упомянул дактилоскопические отпечатки пальцев в качестве ключа в совершенно другом мире.

Современные биометрические технологии могут применяться и применяются не только в серьезных режимных учреждениях, но и в повседневной жизни. Зачем нужны смарт-карты, ключи, пароли и другие подобные вещи, если они могут быть украдены, потеряны, забыты? Новое информационное общество требует от нас запоминания множества ПИН-кодов, паролей, номеров для электронной почты, доступа в Интернет, к сайту, к телефону... На помощь, пожалуй, сможет прийти только ваш уникальный личный биометрический пропуск – палец, рука или глаз. А во многих странах и идентификатор личности, т.е. чип с вашими индивидуальными биометрическими параметрами, уже зашитый в документах, удостоверяющих личность.

Биометрическая система, независимо оттого, на какой из технологий она построена, работает по следующему принципу: сначала записывается образец биометрической характеристики человека, для большей точности часто делается несколько образцов. Собранные данные обрабатываются, переводятся в цифровой код.

При идентификации и верификации в систему вводятся характеристики проверяемого человека. Далее они оцифровываются, а затем сравниваются с сохраненными образцами. По некоторому алгоритму система выявляет, совпадают они или нет, и выносит решение о том, удалось ли идентифицировать человека по предъявленным данным или нет.

Методы и соответствующие им технические средства получения и использования биометрических данных человека в целях его идентификации (верификации, аутентификации или распознавания) определены как биометрические технологии. При этом в биометрических технологиях используются как физические характеристики человека – отпечатки пальцев, геометрия руки, изображение радужной оболочки и сетчатки глаза, голос, видео- и термоизображение лица, подпись (а в последнее время изображения и форма ушей, запах человека), так и поведенческие биометрические

характеристики, например, манера работы на клавиатуре компьютера, динамика написания подписи, стиль и манера походки.

На практике используются как графические особенности (лица, отпечатков пальцев, уха, руки, походки и т.д.), так и специфические особенности биометрических характеристик (форма лица, геометрия руки, длина шага, скорость перемещения и т.д.). На рисунке 1 представлены биометрические характеристики походки. [1]

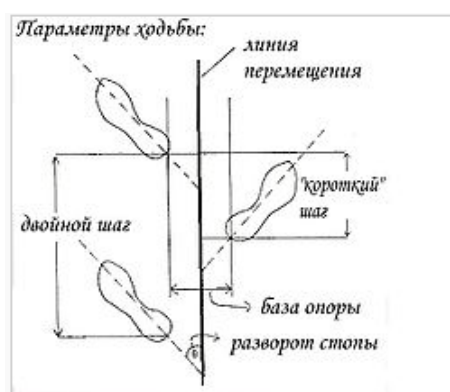


Рис. 1. Общие параметры ходьбы

Биометрические характеристики и их свойства

Биометрической характеристикой человека (БХЧ) называется его измеряемая физическая характеристика или персональная поведенческая черта. Идентификация человека – обладателя этой характеристики – реализуется в процессе проверки БХЧ на идентичность аналогичной характеристики зарегистрированному (санкционированному) пользователю.

На рисунке 2 представлены наиболее часто используемые источники биометрических данных, по которым определяются индивидуальные биометрические характеристики человека. [2, с.13]

На данном этапе развития лидирующие позиции занимает идентификация по отпечаткам пальцев:

во-первых, сказывается опыт длительного (исторического) применения отпечатков пальцев в криминалистике и связанное с этим утверждение международных стандартов на отпечатки пальцев (+ базы отпечатков);

во-вторых, наличие широкой номенклатуры разработанных и внедренных в использование сканеров отпечатков пальцев;

в-третьих, развитая система сканеров, встроенных в компьютерное оборудование (в мыши, клавиатуру, ноутбуки);

в-четвертых, существование готовых к применению законченных устройств и терминалов идентификации отпечатков;

в-пятых, наличие подробно описанных и приведенных практикой алгоритмов идентификации отпечатков пальцев.



Рис. 2. Источники физических и поведенческих биометрических характеристик

Используя геометрию руки очень легко подделать муляж из картона и пластилина, поэтому к такому роду биометрических систем нужно относиться крайне осторожно.

При распознавании лица используют следующие информационные знаки: форма лица (овал, форма и размер отдельных деталей лица), соотношение частей лица между собой, симметрия и т.п. Но здесь также есть существенный недостаток – с возрастом лицо человека меняется (лысеет, седеет, отращивает усы или бороду).

Радужная оболочка глаза является уникальной для каждого человека биометрической характеристикой, но в течении жизни происходят изменения, которые выражаются в виде изменения цвета, появления пигментных пятен, линий, кругов, изменений обвода оболочки, деформации зрачка и т.д.

На основании анализа применения методов идентификации можно выявить ряд недостатков, не позволяющих их использование для оперативного контроля и выявления потенциально опасных субъектов. Для решения данной задачи нами предложено идентифицировать параметры поведения по походке (жестам) человека. Данная идентификация обладает существенным достоинством – это возможность выявления личности представляющей опасность для общества при бесконтактном массовом контроле, при сборе информации со стандартных камер наружного и внутреннего наблюдения с последующей программой обработки данных.

Наблюдение за походкой позволяет сделать нам интересные выводы, основанные на уже имеющихся и разрабатывающихся нами программах обнаружения несанкционированного

поведения субъектов. Манера передвижения во многом зависит от того, к какой цели человек стремится. К тем целям, от достижения которых мы ожидаем вознаграждения, мы устремляемся с большей энергией, чем к тем, которые сулят неприятности. Обычная скорость движения при нейтральном душевном состоянии составляет два шага в секунду. Человек идет медленнее (бредет, плетется), когда не имеет определенной цели, либо когда не слишком сильно стремится цели достичь; в этом случае темп ходьбы — один шаг в секунду. Если же, наоборот, цель желательно достичь поскорее, шаги учащаются и становятся шире. При этом человек ступает преимущественно на носки и сразу же отталкивается, как в спринте. Этим неосознанно достигаются два преимущества: во-первых, передвигаться можно тихо, чтобы незаметно подкрасться к кому-то или чему-то; во-вторых, от такого способа ходьбы легко перейти к настоящему бегу, чтобы в случае необходимости настичь ускользящую цель.

Ходьба широкими, размашистыми шагами чаще наблюдается у мужчин, чем у женщин. Говорят, так ходил Петр Великий — воплощение целеустремленности и энергичности. По крайней мере, таким он изображен на известном полотне В. А. Серова. По такой манере ходить можно сделать вывод, что субъект не представляет угрозы, он спокоен, уравновешен.

Если же ходьба сопровождается несоразмерным раскачиванием и бросающимся в глаза размахиванием руками, отличается подчеркнуто быстрыми шагами, можно предполагать, что субъект готовится к террористическому акту. Такой человек, по нашим наблюдениям, совершенно не отличается от обыкновенного субъекта. Звучная ходьба, подчеркнутый стук обуви также свойствен субъекту, который готовится совершить криминалистическое действие.

Короткие или мелкие шажки, которые чаще наблюдаются у женщин, чем у мужчин, говорят, что человек с такой походкой как бы «держит себя в руках», демонстрируя осмотрительность и расчетливость. В криминалистической ситуации такой субъект сначала все рассчитает, предпочитает действовать один, чтобы если пойдет не по плану быстро изменить направление. Правда, принятие окончательного решения о совершении террористического акта может очень долго откладываться, если в такой походке не выражен четкий ритм.

Прерывистая, спотыкающаяся походка свидетельствует о том, что субъект не склонен к противозаконным действиям.

Подобно многим движениям, походка не только отражает определенное состояние человека, но и в какой-то мере определяет дальнейшие намерения субъекта. Нами

разрабатываются конкретные программы с целью контроля за терроризмом и обнаружением его.

ЛИТЕРАТУРА

1. "Фасе-Интеллект" - идентификация личности по изображению [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.spysite.ru/> – 20.10.10.

2. Кухарев Г.А. Биометрические системы: Методы и средства идентификации личности человека. – СПб.: Политехника, 2001. – 240 с.

3. Стрелков Ю.К. Инженерная и профессиональная психология. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 360 с.

4. Основы физиогномики [Электронный ресурс] / Освещение аспектов жизни молодежи.- Режим доступа: http://www.molodezh-belarusi.ru/OSNOVY_FIZIOGNOMIKI/

5. Рощаль В.М. Физиогномика.- СПб.: АСТ, Астрель-СПб, 2007.- с 32-33

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СВЕТОТЕХНИЧЕСКИХ СВЕТОДИОДНЫХ ИЗДЕЛИЯХ

Акимов Б.В., Гилева В.Н., Дениско С.В., Лукаш В.С., Сорокин В.Т., Юрченко В.И.
ОАО НИИПП,
E-mail: yur_med@mail.ru

Одной из главных проблем светодиодных осветительных приборов (ОП), определяющих долговечность и эффективность работы светодиодов, является проблема отвода тепла от корпуса в окружающее пространство [1-3]. Традиционным способом решения проблемы является использование сильно развитой за счет ребристости поверхности корпуса-радиатора. Наибольшее количество ребер радиатора, как правило, расположено со стороны противоположной световому отверстию ОП. В идеале, такой подход обеспечивает хорошие массо-габаритные характеристики и простоту конструкции ОП. При наружном освещении (улицы, дороги) световое отверстие ОП ориентировано вниз, таким образом, ребристая поверхность корпуса-радиатора ориентирована вверх. В реальных уличных условиях эксплуатации, вероятность того, что в скором времени, межреберное пространство радиатора будет забито различным мусором: листьями, мелкими ветками, почками и семенами деревьев, насекомыми, перемешанными с липкой, несмываемой уличной пылью. Менее распространены конструкции ОП, у которых верхняя поверхность гладкая, а радиаторная часть вынесена на боковую поверхность и ребра

радиатора ориентированы горизонтально, что снижает возможность засорения. При такой ориентации, конвективный съем тепла с ребер радиатора, затруднен, что приводит к необходимости увеличения количества ребер и, как следствие, к увеличению массо-габаритных характеристик.

В настоящей работе была предпринята попытка расчета новой компоновки тепловой конструкции ОП для наружного освещения (рис.1). Данная конструкция должна иметь по сравнению с существующими конструкциями низкую способность к засорению (сохранению эксплуатационных характеристик) и иметь небольшой вес (возможность подвеса на тросах, сниженная материалоемкость – конечная стоимость). Очевидно, что простое объединение в конструкции вертикальных и горизонтальных ребер, не приведет к однозначному наследованию только положительных свойств. Следовательно, для максимального наследования положительных качеств и минимального наследования отрицательных, необходимо введение в конструкцию дополнительных элементов для существенного увеличения конвективного потока.

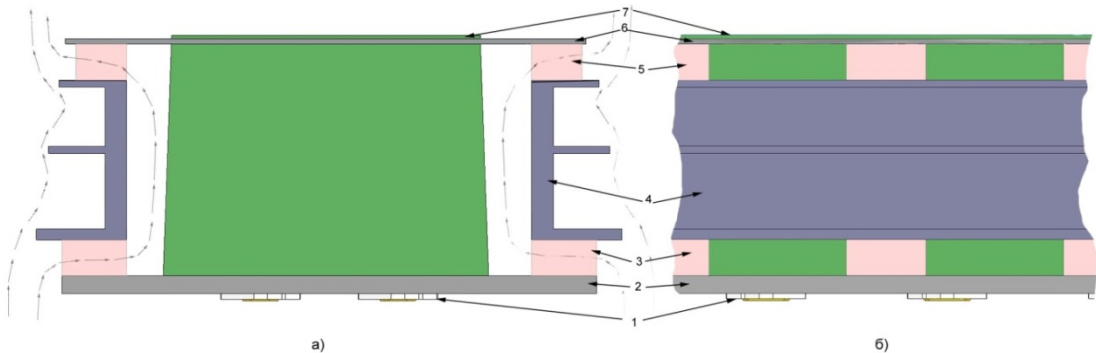


Рис. 1. а) Характерное сечение предлагаемой конструкции; б) фрагмент вида сбоку.

1- светодиодная матрица, 2- основание-пластина, 3- нижняя вставка, 4- радиатор, 5-верхняя вставка, 6- крышка-пластина, 7- коробка под блок питания. Пунктирными стрелками обозначены предполагаемые воздушные конвективные

Конструкция представляет собой параллелепипед традиционных пропорций. Все детали в данной конструкции выполнены из материалов с высокой теплопроводностью, например – алюминия. Верхние и нижние вставки предназначены для:

1) образования зазора, по которому воздух проникает к тыльной стороне радиатора, коробке блока питания, основанию и крышке;

2) осуществления теплового контакта в цепочке: основание - нижняя вставка – радиатор – верхняя вставка – крышка.

Задачей для детального расчета конструкции являются определение форм поверхностей, зазоров и толщин.

Существующие инженерные методы расчета достаточно точны, но они дают усредненную картину по конструкции, т.е. не способны дать ответ о локальном перегреве конструкции (тепловой режим отдельного светодиода или светодиодной матрицы может быть превышен). При сложных конвективных потоках расчет усложняется и теряет точность. Для расчета конкретной конструкции по предлагаемой концепции было использовано приложение Flow Simulation CAD системы Solid Works. Flow Simulation позволяет рассчитывать тепло-массообмен конструкции в газообразной и жидкой среде, при этом учитываются аэро-гидродинамические свойства поверхностей конструкции. Результатом расчетов являются, например, распределение температуры в любом сечении конструкции и среды, скорости и формы потоков среды (воздуха), коэффициент теплопередачи от любой поверхности конструкции в среду. Возможности Flow Simulation позволяют за некоторое количество итераций оптимизировать тепловую конструкцию ОП. Изменяя форму поверхностей, зазоры и толщины можно добиться компромиссного решения между массо-габаритными требованиями и тепловыми, при этом, не забывая о реальности конструкции.

В качестве конкретного примера для расчета был выбран ОП для наружного освещения, оснащенный 18 светодиодными матрицами Zenigata (SHARP) каждая электрической мощностью 6,2 Вт и световым потоком 500 лм. Данный пример выбран в связи с тем что, имелись аналогичные ОП выполненные с вертикальными и с горизонтальными ребрами радиаторов. Параметры светодиодных матриц определены теми технологическими запасами, которые заложены в двух других конструкциях светильника и потому несколько ниже заявляемых фирмой-изготовителем (потребляемая мощность 6.7 Вт, световой поток 540 лм).

Для расчетов были выбраны следующие данные: среда - воздух при давлении 101,3 кПа, влажность 0%; температура окружающей среды - 20 °С; скорость ветра 0 м/с; материал конструкции - алюминий (200 Вт/м*К); плафон - поликарбонат (1,3 Вт/м*К), тепловые зазоры 20 мкм (2 Вт/м*К); электрическая мощность - $18 \cdot 6,2 = 112$ Вт; энергетический выход светодиодных матриц - 30%, т.е. тепловыделение светодиодных матриц - $18 \cdot 6,2 \cdot 0,3 = 78$ Вт; КПД блока питания 87%. т.е. тепловыделение 15 Вт. Также было принято, что температура корпуса не должна превышать 55°С и иметь минимальные массовые характеристики. Была выбрана базовая длина корпуса, высота и

ширина не ограничивались и определялись в ходе расчета.

В ходе многочисленных итераций перебирались различные варианты и параметры концептуальной конструкции: ширина и толщина основания, толщина крышки; длина, высота и расположение верхних и нижних вставок; толщина стенок коробки блока питания; количество, длина и форма ребер радиатора; высота радиатора. В задачу входил только тепловой расчет, и никаким образом не решалась задача художественного дизайна ОП. Результатом расчетом стала конструкция, внешний вид которой представлен на рис.2-4. Вес рассчитанной конструкции без учета крепежа и блока питания составил 4,8 кг. Максимально достигнутая на корпусе светодиодных матриц температура составила 55,5°С.

В ходе расчетов подтвердились два предположения:

- увеличение количества и длины ребер далеко не всегда эффективно, с точки зрения экономии массы;
- наклон ОП к горизонту от 0 до 15 град приводит к увеличению градиента температуры, причем максимальная температура несколько возрастает.

Также было установлено, что размещение и конфигурация блока питания в коробке очень сильно влияет как на тепловой режим светодиодов, так и на собственный тепловой режим. Для выяснения оптимальных параметров блока питания проводятся дополнительные расчеты. Однако в настоящих расчетах было принято, что все тепловыделение блока питания было равномерно распределено по объему коробки.

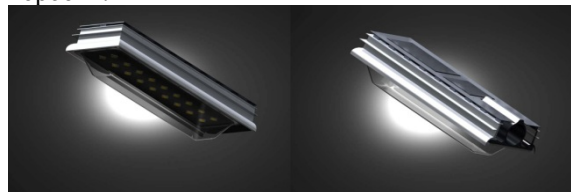


Рис.2. Внешний вид расчетной конструкции ОП для наружного освещения

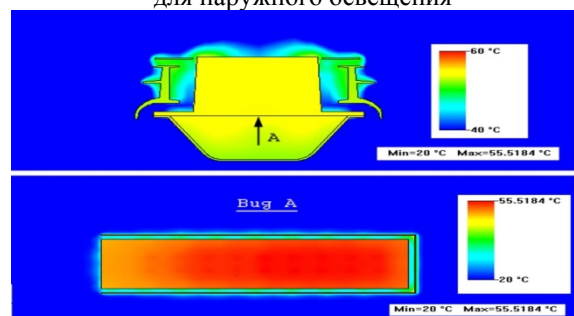


Рис.3. Расчетное распределение температур в характерном сечении ОП и на основании. Максимальная температура системы воздух - ОП равна 55,5°С

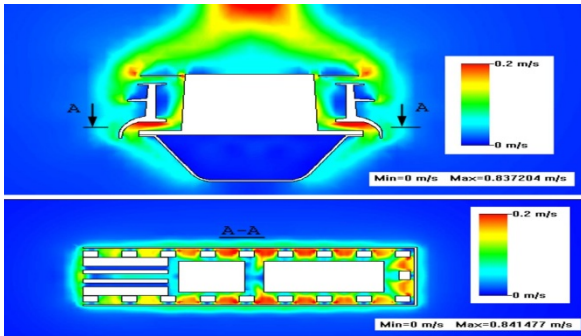


Рис.4. Расчетное распределение скорости конвективных потоков в характерном сечении ОП и в плоскости на уровне нижних вставок. Максимальная скорость - 0,83 м/с находится в конвективной струе выше ОП

Выводы

По сравнению с ребристыми радиаторами при тех же параметрах световых сборок предложенная конструкция имеет несравненные преимущества. Прежде всего, по массе корпуса ОП, которая для ребристого радиатора с расположением ребер вверх составляет 9 кг, а для корпуса с горизонтально расположенными ребрами составляет 11 кг. Вес рассмотренного корпуса светильника составляет 4.8 кг, тепловое сопротивление не превышает 0.3 К/Вт. При этом измеренные температуры на корпусе светодиодных сборок в рабочем положении ОП при внешней температуре среды, равной 20 °С, составляют 58 и 55 °С соответственно, а рассчитанные значения – 60 и 56 °С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лукаш В.С., Юрченко В.И., Бакин Н.Н. Светотехнические изделия на основе полупроводниковых излучающих элементов. Программа Российской научной конференции “Субъекты федерации в условиях реформ” Томск, октябрь, 1994 г. С. 10.
2. Николаев Д., Феопентов А. Основы теплового менеджмента при конструировании ПСП Полупроводниковая светотехника №1, 2010, С. 44-47
3. Задорожный А. 3D – разработка теплоотводящих систем Полупроводниковая светотехника №4, 2010, С. 38-40

ОЦЕНКА ТРАВМОБЕЗОПАСНОСТИ НА РАБОЧИХ МЕСТАХ

Чулков Н.А., Бородин Ю.В.

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: Chulkov45@mail.ru

В России ставят в числе приоритетных целей создание условий, содействующих оживлению экономики в посткризисный период, повышению ее конкурентоспособности, росту производительности труда, стабильной занятости и развитию эффективной инфраструктуры рынка труда, подготовке квалифицированной рабочей силы, безопасности рабочих мест.

В предстоящий период экономическая политика государства должна быть ориентирована на ликвидацию негативных последствий мирового экономического кризиса и обеспечение устойчивости экономического развития на основе перехода от индивидуальных мер государственной поддержки компаний к системным мерам, модернизации и повышения конкурентоспособности, стимулирования инновационной активности и инвестиций в человеческий капитал и создания на этой основе новых эффективных рабочих мест [1].

С принятием Федерального Закона «О техническом регулировании» в нашей стране изменились принципы государственного нормирования требований безопасности. Введены понятия «добровольные требования», «обязательные требования». Последние вводятся в действие техническими регламентами [2].

Технический регламент [3]. устанавливает минимально необходимые требования:

- 1) механической безопасности;
- 2) пожарной безопасности;
- 3) безопасности при опасных природных процессах и явлениях и (или) техногенных воздействиях;
- 4) безопасных условий пребывания в зданиях и сооружениях;
- 5) безопасности для пользователей зданиями и сооружениями;
- 6) доступности зданий и сооружений для инвалидов;
- 7) энергетической эффективности зданий и сооружений;
- 8) безопасного уровня воздействия зданий и сооружений на окружающую среду и др.

Характеристики безопасности здания или сооружения, количественные и качественные показатели систем инженерно-технического обеспечения, посредством соблюдения которых обеспечивается соответствие здания или сооружения требованиям безопасности. Оценка соответствия оборудования требованиям безопасности осуществляется в форме:

- принятия декларации;
- обязательной сертификации.

Контроль за соблюдением требований осуществляется в формах:

- визуального контроля;
- инструментального контроля.

Оценка травмобезопасности рабочих мест проводится нами, в основном, форме визуального контроля. путем сопоставления фактического состояния объектов оценки (производственного оборудования, приспособлений и инструмента, а также обеспечения средствами обучения и инструктажа) с требованиями нормативных правовых актов, эксплуатационных и технологических документов, предусматривающих обеспечение на рабочих местах безопасных условий труда. - по технической документации (проводится проверка наличия актов приемки, разрешений на эксплуатацию объектов оценки, сертификатов, наличия и структуры паспортов и инструкций по эксплуатации) оборудования, приспособлений и инструмента,

Для оценки безопасности рабочих мест предусматривается процедура аттестации рабочих мест по условиям труда. Действующий порядок проведения аттестации рабочих мест по условиям труда, [4] предполагает проведение оценки травмоопасности на конкретном рабочем месте.

Объектами оценки травмоопасности рабочих мест являются [5]:

- производственное оборудование сырье, материалы; приспособления и инструменты, используемые при осуществлении технологических процессов;
- соответствие подготовки работников по вопросам охраны труда установленным требованиям.

Оценка травмоопасности рабочих мест проводится на соответствие объектов, требованиям охраны труда, невыполнение которых может привести к травмированию работников, в том числе [6]:

- требованиям по защите от механических воздействий;
- требованиям по защите от воздействия электрического тока;
- требованиям по защите от воздействия повышенных или пониженных температур;
- требованиям по защите от токсического воздействия химических веществ.

Оценка травмоопасности производственного оборудования, сырья, материалов проводится путем анализа технической документации, содержащей требования безопасности при выполнении работ, внешнего осмотра производственного оборудования в ходе штатной

работы на соответствие его состояния требованиям действующих нормативных правовых актов по охране труда. комплекта эксплуатационной документации; средств защиты работников от воздействия движущихся частей производственного оборудования, а также разлетающихся предметов; ограждений элементов производственного оборудования, повреждение которых связано с возникновением опасности, включая наличие фиксаторов, блокировок, герметизирующих и других элементов; сигнальной окраски и знаков безопасности; сигнализаторов нарушений нормального функционирования производственного оборудования, средств аварийной остановки, включая наличие устройств, позволяющих исключить возникновение опасных ситуаций при полном или частичном прекращении энергоснабжения и последующем его восстановлении, а также повреждении цепи управления энергоснабжением (самопроизвольного пуска при восстановлении энергоснабжения, невыполнения уже выданной команды на остановку); защиты электрооборудования, электропроводки от различного рода воздействий.

Оценка травмоопасности инструментов и приспособлений проводится путем внешнего осмотра и проверки соответствия их состояния требованиям нормативных правовых актов по охране труда.

При оценке травмоопасности производственного оборудования, а также инструментов и приспособлений может проверяться также наличие сертификатов или деклараций соответствия требованиям безопасности.

Результаты оценки травмоопасности рабочего места оформляются протоколом оценки травмоопасности рабочего места.

По результатам оценки травмоопасности условия труда на рабочем месте могут быть классифицированы по 3 классам.

С 1 сентября 2011 года начинает действовать новый порядок проведения аттестации рабочих мест по условиям труда [7]. Требования к компетенциям организаций и специалистов участвующих в оценке травмоопасности возрастают.

Специалисты, проводящие оценку травмоопасности должны быть экспертами высокого уровня прошедшие специальную подготовку и имеющие большой опыт в организации работ по охране труда. Они должны предлагать методы и способы приведения условий труда в нормальное состояние.

Пока оценка травмобезопасности проводится на качественном уровне. Предполагается переход к оценке риска на рабочем месте. Нормативно величина приемлемого риска установлена не

более 10^{-6} раз в год на объект. Методику количественного расчета риска травмоопасности внедрить достаточно проблематично учитывая необходимость введения экономических показателей.

Предполагается, что, риск потенциального травмирования оправдан, если:

$$R < \frac{V-P-X}{\alpha}$$

где: V - валовый доход;

P - затраты на производство;

X - затраты на защиту;

α - цена риска - денежный эквивалент риска.

Обоснование денежного эквивалента единицы риска и его конкретного расчета по рабочему месту достаточно трудоемкая задача.

В целях снижения профессионального риска и обеспечения предупредительных мер Фонд социального страхования РФ применяет расчет скидок и надбавок к страховым тарифам. Эта экономическая оценка состояния профессионального риска строится на деятельности за предыдущие три года. Она не дает текущую оценку травмобезопасности на рабочем месте.

В связи с этим экспертная оценка травмобезопасности на современном этапе остается востребованной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Генеральное соглашение между общероссийскими объединениями профсоюзов, общероссийскими объединениями работодателей и Правительством Российской Федерации на 2011-2013 годы от 28 декабря 2010г.

2. О техническом регулировании № 184-ФЗ.

3. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений N 384-ФЗ.

4. Порядок проведения аттестации рабочих мест по условиям труда. Приложение к Приказу Минздравсоцразвития России от 31.08.2007 N 569

5. Лускин А.З., Чулков Н.А. и др. Проблемы качества диагностики безопасности труда с использованием информационных технологий в организациях топливно-энергетического комплекса Томской области. Проблемы качества, безопасности и диагностики в условиях информационного общества. (Материалы научно-практической конференции). – М.: МИЭМ, 2005. с420.

6. Гуляев М.В., Куцепаленко В.Ф., Чулков Н.А. Исследование факторов, определяющих формирование опасной производственной среды. Одиннадцатая научно-техническая конференция “Энергетика: экология, надежность, безопасность.”- Томск Изд-во ТПУ 2005.

7. Порядок проведения аттестации рабочих мест по условиям. Приложение к Приказу Минздравсоцразвития России от 26 апреля 2011 г. N 342н.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМО-ЭДС ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Солдатов А.А.

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: soldatov.88@bk.ru

Введение

Продуктопроводы являются составной частью общей мировой системы транспортировки жидких и газообразных продуктов. Наибольшее распространение имеют трубопроводы по перекачке газа, нефти, и продуктов их переработки. Максимальную экологическую опасность представляют продуктопроводы, по которым транспортируются отравляющие вещества, подобные аммиаку. На втором месте находятся нефтепроводы. При эксплуатации магистральных трубопроводов установлено, что аварии концентрируются в местах появления пластической деформации.

Кроме того среди технологических приемов упрочнения наряду с оптимизацией процессов формования, спекания, легирования и термической обработки, в последнее время прибегают и к деформационным обработкам по определенным режимам. Таким образом, возникает актуальная необходимость контроля степени пластической деформации.

Локализация областей пластической деформации, предшествующей разрушению, необходимо для выявления остаточного ресурса изделий из металлов, работающих под нагрузкой. Среди неразрушающих методов определения пластической деформации можно выделить:

- рентгеновский,
- ультразвуковой.

Однако перечисленные методы имеют ограниченное применение и не всегда позволяют точно определить место возникновения пластической деформации.

Предложенный метод основан на термоэлектрическом эффекте, заключающемся в том, что в замкнутой цепи, состоящей из двух разнородных проводников, спаи или контакты которых находятся при различных температурах, возникает ток. В случае разогрева контакта двух образцов до температуры T_2 , отличающихся по энергии выхода электронов в точке контакта, в электрической цепи возникает электродвижущая сила. По величине возникающего тока в цепи можно будет сделать определенные выводы по относительной величине пластической деформации.

В настоящее время приборы термоэлектрического контроля металлов и сплавов не получили широкого распространения из-за низкой точности и плохой повторяемости результатов измерения, в результате чего снижается достоверность контроля изделий из

металла. Этот недостаток обусловлен зависимостью величины термо-ЭДС от сопротивления контакта горячего электрода с контролируемым изделием и его зависимостью от разности температуры между горячим и холодным электродами [1].

Для устранения этого недостатка предлагается использовать дифференциальный метод. Чувствительность и точность этого метода на различие по энергии выхода электронов выше метода термо-эдс, так как температурный режим в контактных точках сохраняется одинаковым как для эталона так и для образца.

Принцип измерения дифференциальной термо-ЭДС

Схема, приведенная на рис.1 и используемая в изготовленном приборе, работает следующим образом. Электрическая цепь, состоящая из эталона Э, горячего электрода 2, испытуемого образца X, холодных электродов 1,4 и гальванометра G, замыкается горячим электродом 2, предварительно нагретым нагревателем 3 до температуры T_2 . В случае одинаковых химических составов и состояний эталона и испытуемого образца, термо-э.д.с. контактов Э-2 и 2-X будет равна по величине, но противоположна по направлению и, следовательно, гальванометр не регистрирует наличие в цепи э.д.с.

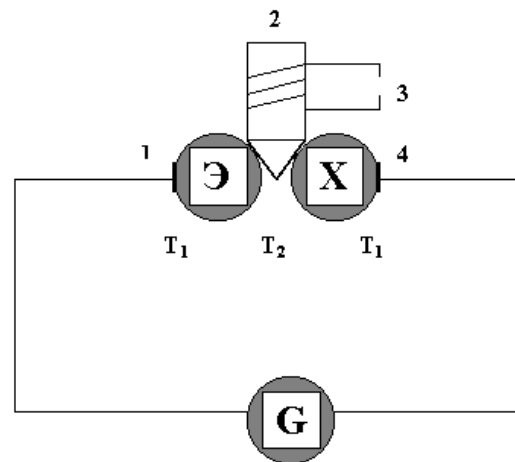


Рис.1. Принципиальная схема измерения дифференциальной термоэлектродвижущей силы, используемая в приборе «Термотест»

В случае различного химического состава либо структурного состояния поверхности эталона и испытуемого образца, величина термо-э.д.с. контактов Э-2 и 2-X будет различна по

абсолютной величине и определяться температурой T_2 горячего и T_1 холодных электродов. В этом случае гальванометр регистрирует наличие в цепи э.д.с., величина которой равна алгебраической сумме термо-э.д.с. контактов Э-2 и 2-Х (т. е. дифференциальная термо-э.д.с.), что свидетельствует о различном химическом составе либо структурном состоянии поверхности эталона и испытуемого образца. Размеры эталона и образца не оказывают влияния на дифференциальную термо-э.д.с., если выполняется условие равенства температуры контактов образцов с холодными электродами. В предлагаемом приборе возможность возникновения паразитных термо-э.д.с. из-за различной температуры контактов эталона и образца, исключены благодаря оригинальной конструкции датчика.

Кроме того контроль сталей прибором «Термотест» возможен только для качественных и высококачественных сталей и сталей обыкновенного качества группы Б и В. Стали же обыкновенного качества группы А контролировать нельзя, т. к. они поставляются только по механическим свойствам и не гарантированным химическим составом (одна и та же марка стали группы А может иметь различный химический состав).

При контроле изделий необходимо обеспечить электрический контакт горячего электрода с контролируемым изделием, при этом происходит уменьшение температуры горячего электрода за счет передачи части теплоты контролируемому изделию. Изменение температуры приводит к изменению показаний прибора при длительном контроле изделий, так как постоянная времени процесса нагрева и охлаждения горячего электрода является величиной конечной и в результате температура горячего электрода флуктуирует в некоторых пределах. Применение дифференциального метода измерения термо-ЭДС позволяет повысить стабильность показаний прибора. Для этого используют датчик состоящий из двух горячих электродов, имеющих общую систему терморегулирования [2].



Рис.2. Образец из материала: 0,8ПС-5

Для проведения экспериментальных исследований были подготовлены образцы, один из них приведен на рис.2, на которых вырезаны насечки для локализации места разрыва. Испытаниям подвергались по 5 образцов из каждой марки сталей:

- 0,8ПС-5;
- 12Х18Н10Т;
- Сталь3.

Поверхность образцов при контроле должна быть очищена от грязи, жировых пятен и зачищена до металлического блеска. Зачистку рекомендуется вести абразивным кругом, но без прижогов.

Насечки на образцах делались с помощью абразива, чтобы на них не было посторонней металлической стружки, влияющей на величину термо-ЭДС. С помощью разрывной машины подготовленные образцы подвергались деформации. В местах деформации проводились измерения дифференциальной термо-ЭДС, специально изготовленным прибором «Термотест». Прибор состоит из электронной части, смонтированной в одном корпусе и дифференциального датчика.



Рис.3. Разрывная машина МИРИ-100К

Эксперименты проходили на разрывной машине МИРИ-100К, показанной на рис.3, с компьютерным управлением и записью диаграммы растяжения. Разрывная машина типа МИРИ-100К предназначена для статических испытаний образцов металлов и сплавов на растяжение при нормальной температуре по ГОСТ 1497, 6996, 10006, 27208

В качестве эталона использовалось изделие, изготовленное из той же марки стали, что и испытуемый образец. Во время растяжения образца измеряли термо-э.д.с. в местах предполагаемой пластической деформации и вблизи нее. Контроль осуществлялся контактным

методом, при котором время одного измерения не более 3 секунд.

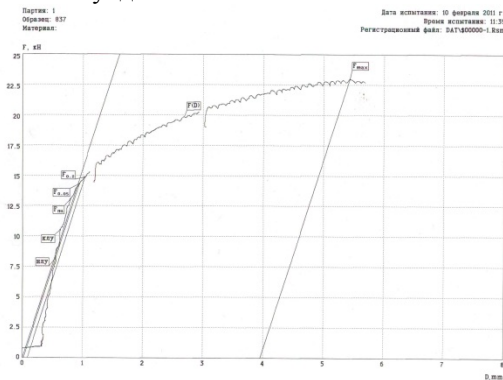


Рис. 4. Диаграмма испытаний

После проведения экспериментов на разрывной машине, специальное программное обеспечение установленное на ЭВМ, строит диаграмму испытаний, показанную на рис.4, зависимость удлинения испытуемого образца от силы растяжений. Область до 15кН соответствует упругой деформации, область от 15кН до 23кН соответствует пластической деформации.

Процесс растяжения осуществлялся в 4 этапа. На каждом этапе фиксировалась сила растяжения и измерялась термо-ЭДС: на первом этапе – в области упругой деформации, на втором этапе – при переходе в область небольших значений пластической деформации, на третьем этапе – в области средних значений деформации и на четвертом этапе – перед разрушением.

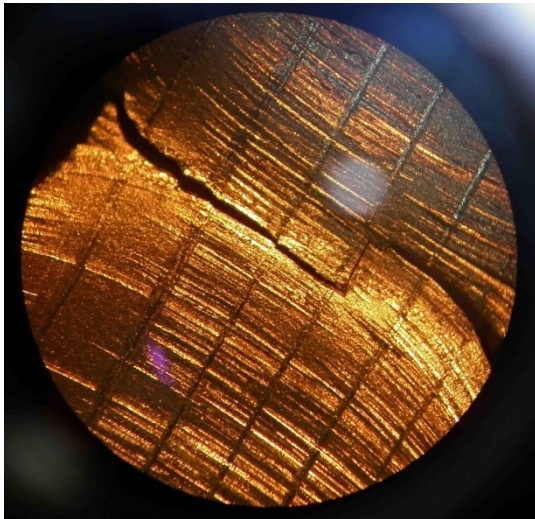


Рис.5. Образец после испытаний

Образец под микроскопом после проведения эксперимента на разрывной машине показан на рис.5. Образец разорвался там где делались насечки, т.е. в том месте где было предположено, и измеряли термо-эдс. На рис. 6 показана зависимость термо-ЭДС от удлинения

испытуемого изделия. Из рисунка видно, что в области упругой деформации изменения термо-ЭДС не наблюдается, при появлении пластической деформации происходит увеличение термо-ЭДС с увеличением величины деформации. Минимальное значение термо-ЭДС достигается при максимальном значении деформации перед разрушением образца.

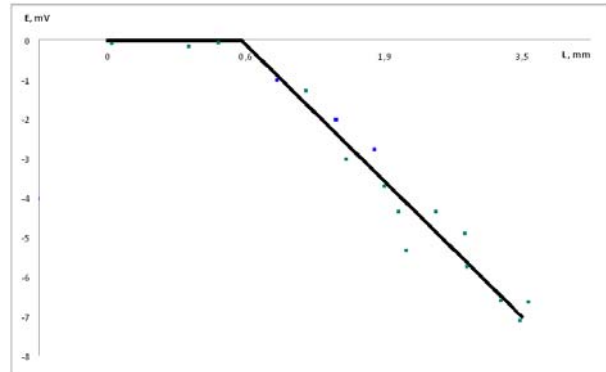


Рис. 6. Зависимость термо-ЭДС от удлинения

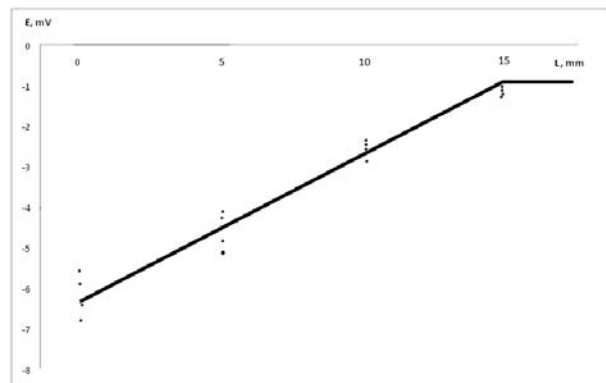


Рис. 7. Зависимость термо-ЭДС от расстояния

На рис. 7 приведена зависимость термо-ЭДС от расстояния до места пластической деформации. Минимальное значение термо-ЭДС соответствует месту появления пластической деформации. С удалением величина термо-ЭДС уменьшается и при расстояниях превышающих 15 мм изменение термо-ЭДС не наблюдается.

Таким образом, методом дифференциальной термо-ЭДС можно определить место пластической деформации с высокой точностью.

ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Линецкий Я.Л. Физические свойства металлов и сплавов, М., Металлургия, 1980 г.
2. Прибор термотест. Методика неразрушающего контроля металлов и сплавов. Томск, Изд-во ТПУ, 2007

КОНТРОЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ

Дуреев В.В.

Юргинский технологический институт (филиал) Томского политехнического университета, 652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская 26, тел. (38451)62248

E-mail: wad2000@mail.ru

Резание металлов сопровождается большими энергетическими затратами и интенсивным тепловыделением. Температура режущего инструмента при резании в тяжелых условиях может достигать более 1000 °С, что может вызвать преждевременное разрушение режущего инструмента. Однако необходимо знать температуру при резании не только в режущем материале, но и во всей зоне резания. Такие измерения практически невозможно производить наиболее распространенными в настоящее время способами для измерения температуры при резании металлов. Особенно усложняется данная задача, когда используются составные или композиционные режущие инструменты. Для решения подобных задач в настоящее время появляется много новых способов для проведения контроля и измерений изучаемых процессов. Одним из таких способов является проведение исследований при помощи тепловизора.

Для определения работоспособности разработанных и изготовленных составных режущих пластин были проведены эксперименты по определению температурных полей при резании, так как ввиду различия в конструкции для одного и того же материала режущей части изменяются условия отвода тепла из зоны резания, а остальные показатели должны оставаться примерно на одинаковом уровне. Для наиболее объективной оценки тепловых полей был выбран однофакторный эксперимент с разными режущими пластинами: однородными и композиционными. В качестве однородных использовались режущие пластины для отрезных токарных резцов (ГОСТ 18884-82, исполнение 1 [1]) из твердого сплава Т15К6, которые закреплялись механически на отрезном резце разработанной конструкции. Композиционные пластины были изготовлены со вставкой из твердого сплава Т15К6 (вырезанные из режущих пластин для отрезных токарных резцов по ГОСТ 18884 исполнение 1) с размерами напайных режущих пластин (рис. 1). Они изготавливались в двух вариантах: по разработанной технологии [2] и с дополнительной (выполненной после спекания) инфильтрацией медью. Все режущие пластины закреплялись механически в одной державке разработанной конструкции.

Эксперименты проводились на токарно-винторезном станке «Кусон 3». Обработка проводилась при точении заготовки (трубы) на продольной подаче имитируя свободное резание. Перед проведением экспериментов заготовки

предварительно обрабатывались для удаления дефектного слоя.



Рис. 1. Составная режущая пластина

Заготовки крепились в трехлачковом патроне и поджимались задним вращающимся центром. Заготовки (сталь 55 ГОСТ 1050-88) подвергались контрольным исследованиям на соответствие физико-механических свойств в металлографической лаборатории ООО «Юргинский машзавод». Диаметр заготовки 150 мм, толщиной стенки 3,5 мм (при длине лезвия 5 мм), скорость резания 187 м/мин, продольная подача 0,1 мм/об (рис. 2).



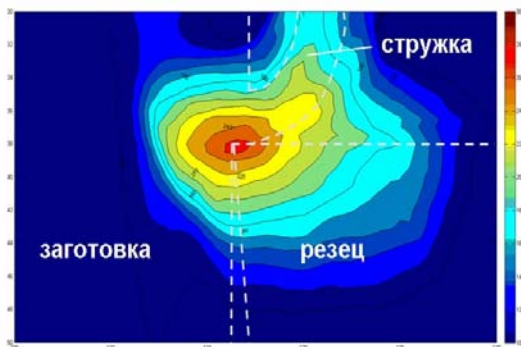
Рис. 2. Общий вид зоны обработки

Измерение теплового поля проводилось тепловизором ThermoCam P65 HS фирмы FLIR (рис. 3), позволяющим производить измерение в диапазоне температур от -40 °С до +1500 °С с тепловой чувствительностью до 0,08 °С, на боковой поверхности резца через 60 секунд после начала обработки. Каждое измерение теплового поля длилось не менее 10 секунд. Исходные картины теплового поля, полученные тепловизором, передавались в виде матриц в программу MathLab, в которой производилась их обработка и построение диаграмм теплового поля при резании однородной (рис. 4 а) и составной

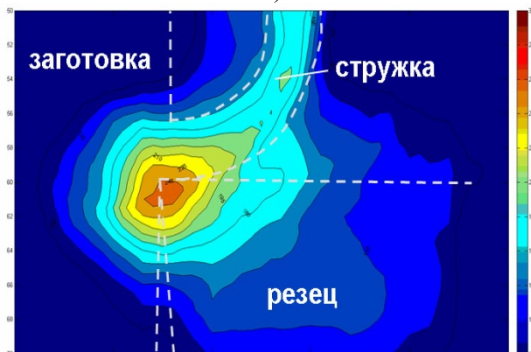
(рис. 4 б, в) режущими пластинами.



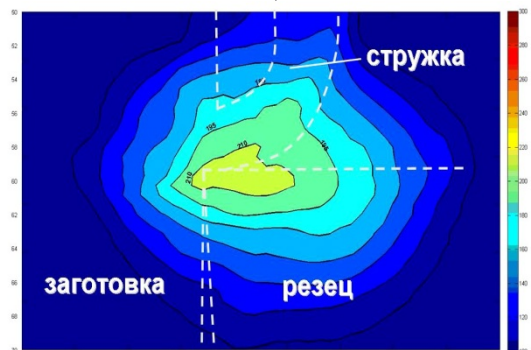
Рис. 3. Измерение теплового поля тепловизором ThermoCam P65 HS



а)



б)



в)

Рис. 4. Тепловые поля: а) в однородной пластине; б) в составной пластине; в) в составной пластине с инфильтрацией медью. (положение заготовки, резца и стружки показано условно)

В соответствии с диаграммами теплового поля отчетливо видно, что в случае обработки однородной пластиной максимальная температура при резании достигала 255°C , а при резании композиционной режущей пластиной с инфильтрацией медью максимальная температура достигла только 210°C . Следовательно температура упала на 45°C или почти на 18%, что связано с более лучшим теплоотводом за счет основы композиционной пластины с более высоким коэффициентом теплопроводности по сравнению с твердым сплавом в однородной пластине [3].

В ходе проведенных экспериментов удалось произвести измерение температуры на боковой поверхности режущего инструмента, а так же, одновременно, получить общую картину тепловых полей во всей зоне обработки металлов на: резце; заготовке; стружке. В результате проделанной работы, можно сделать вывод, что использование тепловизора при определении температуры при резании на поверхностях режущего инструмента, материала заготовки, а так же стружки возможно. Однако желательно дополнительно использовать объектив с макросъемкой для более качественного и точного получения данных.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 18884 – 73 Резцы токарные отрезные с пластинами из твердого сплава. Конструкция и размеры. – Введ. 01.01.74. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 6 с. (Гос. Комитет СССР по стандартам)
- Дуреев В.В. Изготовление составного режущего инструмента со вставкой из твердого сплава // Материалы 7-ой Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе». – Новосибирск: Изд. НГТУ, 2009. – 126 с. С.108-111
- Дуреев В.В., Петрушин С.И. Перспективы по использованию композиционного составного твердосплавного режущего инструмента // Труды Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодежи. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 309 с. – С. 91-93

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ТЕОРЕТИКО-ГРУППОВАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ЛОКАЛЬНОЙ ГРУППОЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Баранов В.А., Эверт У.*

НИИ НК при Томском Политехническом Университете

*Bundesanstalt für Materialforschung und prüfung, г. Берлин, Германия

E-mail: ram1@mail.tomsknet.ru

Рассмотрены новые методы обработки изображений, основанные на статистической оценке инвариантов групп автоморфизмов изображений. Разработан теоретико-групповой статистический подход к решению задач реконструкции изображений, позволяющий визуализировать структурно-функциональные связи в объекте контроля. Предложенные методы применены для решения задач восстановления зашумленных изображений в неразрушающем контроле.

Трудности решения обратных задач обработки изображений и пути их преодоления

При математическом описании того или иного круга явлений важнейшую роль *математические модели* [1]. Их ценность состоит в предсказательных возможностях. Модели служат основой для теоретических выводов, проверяемых затем экспериментально. Извлечение такого рода следствий называется решением *прямой задачи* [1]. Если уточняется сама модель (например, корректируются ее функциональные и параметрические характеристики после сопоставления с экспериментальными данными), то говорят, что решается *обратная задача* [1]. Циклы усовершенствования модели, включающие поочередное решение прямых и обратных задач, могут повторяться многократно. Как известно, типичные задачи реконструкции изображений некорректны. В особенности, это касается неразрушающего контроля (НК), например, такой актуальной задачи НК, как выявление зон формирования трещин в компонентах работающих машин и агрегатов [11]. По критерию Адамара обратная задача корректна, если решение: 1) существует, 2) единственно, 3) устойчиво. На практике условия 2 и 3 обычно нарушены. Трудности реконструкции дополнительно усугубляются еще и тем, что информация о формирующей исходное изображение передаточной функции часто остается недоступной.

Отмеченные обстоятельства стимулируют разработку унифицированного подхода к реконструктивным задачам, позволяющего с уверенностью выявлять важные для практики характеристики объекта контроля и визуализировать их пространственные распределения в условиях острой некорректности задачи. Это достижимо в рамках «структурно-ориентированного» подхода [5, 7, 9, 10, 12] к исследованию и реконструкции объектов,

основанного на сближении классического *структурного метода* с методами математической статистики. Целью данной работы является развитие статистических теоретико-групповых моделей реконструкции изображений и разработка на их основе методов ОИ, пригодных для решения задач НК.

Структурно-ориентированный подход к восстановлению изображений

Структура в обыденном понимании это *строение* или *форма*. В науке и философии *структурой* называют совокупность устойчивых связей и отношений в объекте, обеспечивающих его целостность и *самостоятельность* при различных внешних и внутренних изменениях. Такое, более строгое, понимание складывалось постепенно и окончательно оформилось в конце XIX-ого столетия, сначала в химии, в связи с возникновением «теории химического строения», а затем распространилось как в естественных, так и в гуманитарных науках. В этом же смысле понятие *структура* трактуется и в современной математике. Оно применяется к множествам, природа элементов которых не определена. Чтобы определить структуру (не элементы) задаются соотношения, в которых находятся между собой элементы множества (так называемая *типовая характеристика* структуры), которые затем используются как *аксиомы структуры*. Все, происходящие в объекте изменения реализуются на уровне его элементов, тогда как его структура остается неизменной. В математизированных моделях такие изменения чаще всего описываются *теоретико-групповыми преобразованиями* [2], точнее *автоморфизмами объекта*, образующими его *группу автоморфизмов*. В структуре отражены интегративные свойства объекта, которые не могут быть непосредственно «выведены» из свойств составляющих ее элементов.

Связи и отношения между элементами (*структурно-функциональные связи*), остающиеся при преобразованиях неизменными, называются *структурными инвариантами*. Основной задачей как структурного подхода вообще, так и структурно-ориентированных методов, в частности, является обнаружение, оценка и классификация таких инвариантов. Все другие характеристики исследуемых объектов или «систем» оцениваются на их основе.

Условия A_0 исходной реконструктивной задачи т.е. набор «объективных утверждений» об объекте контроля, неявным образом

ограничивающих множество ее допустимых решений, удобно рассматривать как аксиомы некоторой восстанавливаемой структуры. Поскольку исходная задача некорректна (т.е. условия Адамара 2 и 3 нарушены), утверждения A_0 представляют собой лишь часть аксиом структуры. Они должны быть дополнены утверждениями A_S субъективного характера т.е. гипотезами, необходимыми для регуляризации задачи. Любая некорректная задача вернее, специфическая корректная задача, определяемая одновременным выполнением условий A_0 и A_S , решается в рамках такого «субъект-объектного единства»

Предположения A_S часто рассматриваются как достаточная для решения задачи «априорная информация», что не вполне верно, поскольку для решения нужна «интегрирующая идея». Разница в том, что «информация» может быть полностью формализована в отличие от идеи, которая представляет собой «единство *ratio* и интуиции».. В математике имеется множество случаев, когда доказано существование решения некоторой обратной задачи при дополнительных предположениях A_S (т.е. условие Адамара 1 выполнено), тем не менее конструктивный путь нахождения решений, удовлетворяющих условиям 2 и 3, не найден т.е. обратная задача не решена. Заметим, что в таких разделах математики как математическая логика и теория доказательств вовсе нет разделения на обратные и прямые задачи. При этом интересуются, главным образом, «логической эквивалентностью» двух утверждений, не обращая внимания на тот факт, что «в эволюционном плане» прямая и обратная задача не эквивалентны. Прямая задача может быть решена формально и «аналитически», тогда как решение обратной задачи требует «синтетического» т.е. содержательного и интуитивного мышления. Каких-то общих методов решения любых обратных задач не существует, как не существует универсального алгоритма делать научные открытия. Тем интереснее разработка унифицированных путей для решения широкого (хотя и ограниченного) круга обратных задач.

В рамках структурно-ориентированного подхода [5, 7, 9, 10, 12] такого рода унифицированный конструктивный путь возможен. В нем предположения A_S представляют собой основную «интегрирующую» идею - гипотезу о некоторой группе G_S , рассматриваемой в качестве «кандидата» на роль группы автоморфизмов объекта исследования.. Формальный аппарат такого подхода построен на синтезе идей теории групп и математической статистики.

Математическая модель в рамках структурного подхода может быть как детерминистской так и статистической, однако. при решении обратных

задач на основе чисто детерминистского («жесткого») подхода аксиомы A_0 и A_S часто оказываются несовместными, а при их совместности предположения A_S - малоинформативными. Наиболее гибкие методы решения реконструктивных задач разработаны в рамках «мягких» статистических моделей. Классический структурный анализ, основанный на теории групп и идеально приспособленный для исследования целостных объектов является «жестким». Он непригоден для решения синтетических задач, тем более для их алгоритмизации, именно потому, что это анализ. В нем нет формальных процедур («решающих правил», «решающих функций»), позволяющих восстановить целое по набору его неполных и зашумленных проекций.

Для построения разнотипных (и, на первый взгляд, весьма далеких друг от друга) теоретико-групповых статистических реконструктивных процедур используется одна сквозная идея - самоподобие целого, что включает в себя как подобие целого и фрагмента, так и подобие фрагментов. Для алгоритмизации реконструктивной процедуры степень подобия между объектами необходимо оценивать количественно, поэтому существенным компонентом любой процедуры такого рода являются нелинейные «меры сходства» и «меры различия» между объектами. При теоретико-групповом исследовании изображения какого-либо объекта возникают (за счет теоретико-групповых операций) другие изображения, которые мы называем «внутренними ракурсами» объекта, «число» которых совпадает с порядком группы. Для оценки совместности всей совокупности «внутренних ракурсов» конструируются множественные «меры сходства» и «меры различия»

Возможно, наиболее простые (и наиболее «древние») статистические теоретико-групповые методы реконструкции основаны на усреднениях по группе, что позволяет резко уменьшить размерность задачи и одновременно повысить устойчивость решения. На эффективность этого приема указывал еще Г.Вейль. Классический метод обратных проекций в томосинтезе и томографии, как и его аналоги в ОИ, может быть понят и проинтерпретирован с этой точки зрения. Более плодотворный подход основан на нелинейных усреднениях по группе, лежащих в основе нелинейного обратного проецирования [6, 8]. На этих оценках построен «нелинейный томосинтез» [3, 4, 5, 9], хорошо зарекомендовавший себя в решении задач малоракурсной томографии.

Методы статистической оценки и реконструкции изображений на основе локальной группы преобразований

Вышеизложенное представляет собой ядро структурно-ориентированного подхода [9, 10, 12], общее для разработанных авторами методов ОИ и реконструктивной вычислительной диагностики (РВД). Для иллюстрации возможностей подхода необходимо рассмотреть более подробно какую-то отдельную «ветвь» этого «дерева методов». Более всего для этой цели подходят легко алгоритмизируемые методы, основанные на сближении методов современной дифференциальной геометрии с методами математической статистики [9, 10, 11, 12].

В предварительной (нестатистической) постановке задачи реконструируемое изображение, которое должно бы адекватно описывать объект контроля, рассматривалось как гладкое дифференциально-геометрическое многообразие в некотором конфигурационном пространстве S_C . В этом случае для него справедливы соображения «геометрии в малом» и возникает интересная возможность исследовать его путем проверки теоретико-групповых гипотез. Будем проверять «нулевую» гипотезу, является ли некоторая группа Ли L_S локальной группой автоморфизмов для данного многообразия в точке с координатами $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{1M}$ элемента изображения в S_C

По сути дела, гипотетическая локальная группа L_S задает «фон» изображения. Вполне понятно, что изображение как содержательное сообщение не сводится к одному лишь фону и в некоторых его элементах наблюдается понижение локальной симметрии т.е. в них автоморфизмы группы L_S не выполняются. Пониженная, т.е. существующая в отличие от L_S «объективно», симметрия описывается другой группой L_O . Содержательность итогового изображения достигается разницей симметрий L_S и L_O . Для ее количественной оценки сконструируем неотрицательную «меру различия»

$$\Phi = \Phi(L_S, L_O, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{1M}) \quad (3.1)$$

Во «вторичном изображении» (3.1) представлены как инвариантные, так и неинвариантные (относительно L_S) свойства объекта (т.е. фон или «норма» с $\Phi = 0$ и «аномалии» с $\Phi > 0$), причем одновременное их присутствие принципиально необходимо. Мера (3.1) является, вообще говоря, нелинейным функционалом исходного изображения I_O . При этом группа L_O обычно не входит явно в (1) в качестве аргумента

Гипотеза о том, что многообразии описывается геометрией группы L_S (в малом) становится бессмысленной при разрушениях информационного образа объекта (например, при зашумлении в измерительном тракте интроскопа). В общий шум внесут свою долю еще и помехи от вполне детерминистских структур с симметриями,

отличными от L_S . Тем не менее, структурные инварианты, характеризующие фон, и структурно-функциональные связи объекта, продолжают еще сохраняться в видоизмененной деградированной форме не в бесконечно малой, а в некоторой конечной окрестности элемента разрушенного изображения объекта. Дело в том, что алгебраические свойства объектов значительно устойчивее их «лежащих на поверхности» топологических свойств. Поэтому очень многие важные для практики характеристики объекта контроля успешно «переживают» умеренные катастрофы.

Для реконструкции существенных свойств объекта по разрушенному информационному образу адекватным является статистический подход [12] к проверке теоретико-групповой нулевой гипотезы в конечной окрестности элемента изображения. При этом строится мера отклонения F от условий нулевой гипотезы, аналогичная (3.1), но уже статистическая. Поскольку статистический метод по своей природе является «выборочным», группа L_S заменяется в F соответствующей конечной подгруппой L_S . Статистика F используется затем в качестве распределения яркостей итогового изображения. Меняя ключевую группу L_S , можно выявлять другие структуры объекта. На основе данного подхода разработаны алгоритмы обработки изображений, нашедшие применение в практике контроля.

Структурно-ориентированная фильтрация проекционных изображений железобетонной стены

В качестве иллюстрации возможностей структурно-ориентированного метода с локальной группой L_S рассмотрим подробно достаточно простой конкретный пример его применения на практике. Одной из трудных и актуальных задач, вставших перед Федеральным институтом по контролю и исследованию материалов в Берлине «ВАМ-Berlin» был радиационный контроль строительных конструкций с последующей томографической визуализацией [9]. В течение ряда лет в этом направлении в БАМе осуществлялась широкая программа исследований, проводившаяся при технической поддержке Fuji Film Europe (Дюссельдорф, Германия). В задаче томографической реконструкции внутреннего строения железобетонной стены с ограниченным доступом (участок старого моста) для регистрации радиографических проекций использовались источник излучения на основе ^{60}Co и фотолюминесцентные экраны с биомедицинской системой «BAS2000» (Fuji Film). Геометрия подсистемы измерения проекционных данных – копланарная (как в классическом томосинтезе). Было зарегистрировано 14 проекционных изображений. Проекция размером 400×800 мм

регистрировались на двохенных фотолуминесцентных экранах, размером 400×800 мм. Пространственное разрешение – 10 пар линий/мм. Толщина стены – 400 мм. Расстояние от экрана до плоскости источника – 1000 мм. Источник последовательно смещался вдоль прямой линии в плоскости источника (с шагом 200 мм) в направлении, перпендикулярном стальным стержням в железобетоне [9].

В качестве математического метода томографической реконструкции стены можно использовать нелинейный томосинтез [3–5, 7, 8], однако благодаря шумам, вызываемым рассеянным излучением, потребовались развить существенно новые методы преобразования проекций. Предложенный метод структурно-ориентированной фильтрации, основанный на «локальной симметрии», оказался успешным [9]. Было исследовано несколько вариантов метода, в принципе приводящих к одним и тем же результатам. При всем разнообразии вариантов эти методы часто можно представить в форме обычных (широко используемых в НК) алгоритмов пространственной фильтрации со «скользящим окном» (т.е. модификациям в этих методах подвержены статистические оценки характеристик микроизображений внутри окна, но не сама традиционная схема фильтрации). Задача оценки является при этом квазитомографической. Для непрерывной группы «число» внутренних ракурсов континуально-бесконечно, однако в конкретных практических алгоритмах используется их некое конечное подмножество. По их набору и оцениваются характеристики микроизображений, чаще всего это результирующая яркость центрального элемента.

В строительных конструкциях элементы, отвечающие за определенные структурно-функциональные связи, представляют собой протяженные образования. Им соответствует и определенная материальная суб-структура (например, арматура в бетоне). Если такие структурные элементы не дают никакого вклада в проекционное локальное изображение внутри скользящего окна, то данное изображение в пределах статистической значимости уместно считать изотропным. В противном случае возникают значимые отклонения от изотропности, отождествляемые с инцидентностью элемента центральному элементу микроизображения. В данном случае группой локальной симметрии L_S (теоретико-групповым фильтром) служит группа вращения (называемая также группой $SO(2)$) локального изображения вокруг центрального элемента. Она описывает фон, пустое пространство без сигнала.

Все элементы исходного изображения, являющиеся центрами локальных микроизображений и удовлетворяющие локальной

изотропии, рассматриваются как эквивалентные. Напротив, статистически значимая анизотропия свидетельствует о появлении *смыслового сигнала* (структурного элемента, например, арматуры, в других случаях дефекта, в частности, трещины [11] и т. п.). Здесь применимы сказанные по другому поводу слова П. Кюри о том, что «диссимметрия творит явление». Отклонения от нормы реже, чем норма, их информационная нагруженность выше, поэтому естественно строить алгоритм распознавания таким образом, что симметрия описывает *фон* и *норму*, т. е. наиболее вероятное и тривиальное из того, что может произойти. Наличие симметрии рассматривается, таким образом, как нулевая теоретико-групповая статистическая гипотеза, а появление структурного элемента, как альтернативная гипотеза.

Рассмотрим один из алгоритмов распознавания анизотропии этого класса (с вычислительными затратами близкими к минимальным). В нем все выборочные статистики вычисляются на некоторых подмножествах локального изображения, а именно вдоль прямых линий, проходящих через центральный элемент. Выбираются N различных фиксированных направлений, соответствующих N группам данных для этих подмножеств. Для определенности скользящее окно предполагается квадратным с полушириной M . Пусть p_{ij} и r_{ij} – яркости элементов исходного и итогового изображений ($i=1, 2, \dots, I, j=1, 2, \dots, J$, где I и J – размерности изображения), n ($n=1, 2, \dots, N$) – номер произвольного направления, $a_{1ij}, a_{2ij}, \dots, a_{Nij}$ – средние значения и $q_{1ij}, q_{2ij}, \dots, q_{Nij}$ – среднеквадратичные в N группах данных (при вычислении этих значений центральный элемент не принимался во внимание). Для того, чтобы в дальнейшем не делать формулы громоздкими, индексы i и j будут опущены. Параметр n рассматривается как фактор, предположительно влияющий на средние значения a_1, a_2, \dots, a_N . В соответствии с основными принципами дисперсионного анализа может быть построена статистика (F – отношение Фишера, т. е. межгрупповая дисперсия, поделенная на общую внутригрупповую) с $N-1$ и $N(2M-1)$ степенями свободы:

$$F = \frac{N(2M-1) \sum_{n=1}^N \left(a_n - \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N a_l \right)^2}{(N-1)2M \sum_{n=1}^N (q_n^2 - a_n^2)}, \quad (4.1)$$

описывающая итоговое изображение. Более точно, к полученной формуле может быть применено некоторое нелинейное преобразование $r_{ij}=f(F_{ij})$ типа «look-up-table» так, чтобы обеспечить приемлемую для человеческого глаза

гистограмму яркости. Итоговое изображение, таким образом, «рисует» статистикой Фишера, являющейся в данном случае мерой различия между средними по различным направлениям. Иными словами, в данном подходе предполагается, что та же самая статистика, на основе которой отвергается или принимается гипотеза, может быть использована как количественная мера отклонения от точной симметрии (здесь от изотропии) и служить характеристикой яркости результирующего изображения.

На рисунке 1 представлены результаты структурно-ориентированной фильтрации с привлечением оценки дисперсионного анализа при $N=4$ и $M=32$. Слева (а) — нефигурная проекция, справа (б) — фильтрованная проекция. «Черное» на фильтрованной проекции справа соответствует тем областям, где нулевая теоретико-групповая гипотеза (в данном случае предположение об изотропности микроизображения в локальном пятне вблизи исследуемого центрального элемента) не отвергается. Напротив, «белое» — это свидетельства статистики Фишера о неправомочности нулевой гипотезы при различных уровнях значимости.

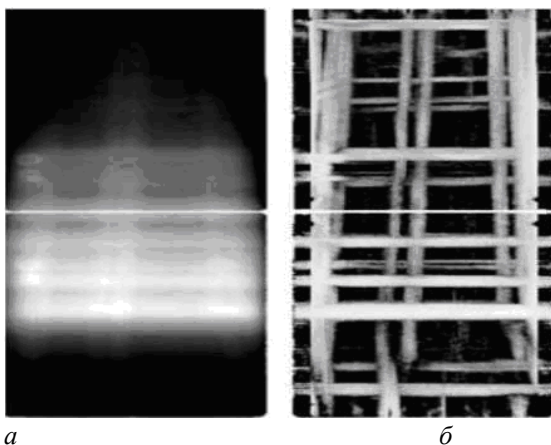


Рис. 1. Структурно-ориентированная фильтрация проекции железобетонной стены. Проекция: а) исходная; б) отфильтрованная

При контроле железобетонных конструкций [9] структурно-ориентированная фильтрация полностью решает практические задачи даже без осуществления томографии. Отметим, что соответствующая математическая задача является некорректной в острой форме, когда даже сам «оператор размытия» исходного незашумленного изображения если и известен, то весьма приблизительно. Фактически, в качестве его параметра использовалась только полуширина окна M . Различными авторами предпринимались также попытки решить эту задачу (фильтрацию предельно зашумленных проекций) на основе хорошо известных и новых методов обработки изображений (модифицированная инверсная

фильтрация, процедуры, основанные на соображениях теории фракталов, «Wavelets» и т. д.), однако они не привели к позитивному результату. В исходном проекционном изображении содержится множество другой смысловой информации, которую можно выявить, меняя ключевую группу L_S , например, визуализировать текстуру грануляции бетона.

Если принципиальные теоретические результаты уже получены, то плодотворны попытки максимально упростить их до тех пределов, когда основанные на этих упрощениях алгоритмы еще работают, давая приближенные практические результаты, не очень сильно отличающиеся от настоящих. Варианты таких упрощенных процедур можно найти в [9].

Результаты и выводы

Особенность структурно-ориентированного подхода к описанию и реконструкции объектов [5, 7, 9, 10, 12] в том, что в нем впервые и систематически проводится сближение теоретико-групповых методов с методами математической статистики. Напомним, что до сих пор в приложениях теории групп (главным образом, образом в теоретической физике) основным инструментом была теория представлений групп линейными операторами [2].

Наиболее значимыми с точки зрения неразрушающего контроля выводами из результатов данной работы являются следующие:

Разработан теоретико-групповой статистический подход для решения реконструктивных задач обработки изображений и предложены методы пространственной фильтрации, основанные на проверке статистической гипотезы о «локальной симметрии» микроизображения в скользящем окне, пригодные для реконструкции предельно зашумленных изображений.

Развиты конкретные статистические теоретико-групповые алгоритмы обработки изображений, основанные на распознавании «локальной анизотропии» с использованием свойств группы $SO(2)$, нашедшие широкое применение в НК.

Потенциальная сфера приложений структурно-ориентированной обработки изображений представляется весьма широкой, включая математическую физику, медицину, обработку спутниковой информации, космическую геологоразведку, геофизику и астрофизику, синтетическую компьютерную психологию, интеллектуальные информационные технологии и т.д. Тем не менее, традиционной и основной областью ее приложений остается неразрушающий контроль материалов. Особенно перспективно ее использование на стыке дефектоскопии и материаловедения. Одной из проблем этого рода, которая уже успешно решается, является визуализация зон

формирования трещин в сварных швах на основе рентгеновских методов, включая и методы томографические [11].

Авторы благодарят д-ра М. Калинга (Fuji Film Europe) за помощь в экспериментальной части работы

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихонов А.Н. Математическая модель // Математический энциклопедический словарь. – М.: Изд-во «Большая Российская энциклопедия», 1995. – С. 343–344.

2. Вейль Г., Классические группы, их инварианты и представления. – М.: Иностранная литература, 1947. – 408 с.

3. Баранов В.А., Чекалин А.С. Система цифрового томосинтеза для неразрушающего контроля // Дефектоскопия. – 1988. – № 5. – С. 30–36.

4. Baranov V., Chakhlov V., Kröning M., Morgner W. High speed computerized tomography on thickwalled steel and concrete components using a portable 6 MeV betatron // 6th European Conference on Non-destructive testing: Collect. of papers. – Nice, France, 1994. – № 2. – P. 1287–1291.

5. Baranov V.A., Temnik A.K., Chakhlov V.L., Chekalin A.S. Betatron tomography with the use of nonlinear backprojection techniques // International Symposium on Computerized Tomography for Industrial Applications: Collect. of papers. – Berlin, 1994. – P. 271–277.

6. Baranov V.A. Convex projections reconstruction algorithms on the basis of non-linear backprojection approach // International Symposium on Computerized Tomography for Industrial Applications: Collect. of papers. – Berlin, 1994. – P. 88–95.

7. Ewert U., Schumm A., Nockeman C., Baranov V.A. Fortschritte auf dem Gebiet der digitalen Laminographie // Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., Jahrestagung 1995 (100 Jahre Röntgenstrahlen und die heutige Vielfalt Industrieller ZfP-Praxis), Aachen. – 1995. – S. 471–475.

8. Baranov V.A. A Variational Approach to Non-Linear Backprojection // Computerized Tomography: Collect. of papers / Editor-in-Chief: M.M. Lavrent'ev. – Utrecht, Netherlands, 1995. – P. 82–97.

9. Ewert U., Baranov V., Borchard K. Cross-sectional imaging of building elements by new non-linear tomosynthesis technique using imaging plates and Co⁶⁰ radiation // NDT & E International, Elsevier Science Ltd. – 1997. – V. 30. – № 4. – P. 243–248.

10. Baranov V., Ewert U. A group-theoretical approach to ill-posed problems // Computer Methods and Inverse Problems in NDT and Diagnostics: Book of abstract to 3rd Intern. Scient. Conf. (CM NDT – 2001). – М., 2002. – P. 11–12.

11. Баранов В.А., Бразовский В.В., Эверт У., Редмер Б. Структурно-ориентированная

визуализация зон образования трещин в компонентах атомных электростанций // Естественные и технические науки, № 5, 2010, стр. 386-391.

12. Баранов В.А., Бразовский В.В., Ивженко О.О., Эверт У. Структурно-ориентированный подход к обработке изображений // Естественные и технические науки, № 5, 2010, стр. 407-413.

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Солдатов А.И.

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: asoldatof@mail.ru

Определение момента прихода сигнала является основой для решения большого круга задач, решаемых в областях, связанных с необходимостью измерения времени распространения сигнала в какой-либо среде. Наиболее распространенный способ определения момента прихода импульса предполагает использование компаратора с фиксированным порогом срабатывания. В том случае, когда форма огибающей описывается медленно меняющейся функцией времени, возникают проблемы точности при изменении амплитуды сигнала.

Результаты моделирования показывают, что зависимость изменения длительности фронта огибающей эхо-импульса по длине волновода имеет сложный характер (рис.1).

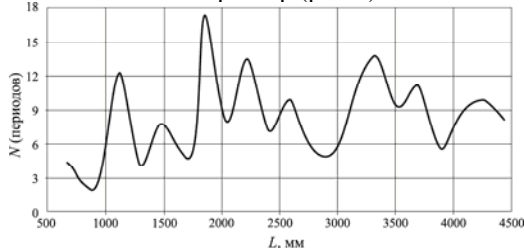


Рис. 1. График изменения длительности фронта огибающей эхо-импульса по длине волновода для частоты 800 кГц, диаметре волновода 52 мм и осесимметричном положении датчика

Поэтому для обеспечения высокоточных измерений, необходимо использовать специальные способы определения момента прихода акустического импульса на приемник. Разработке таких способов способствует бурное развитие однокристалльных микропроцессоров с высоким быстродействием и значительным объемом памяти, что позволяет использовать сложные алгоритмы обработки информации. Одним из таких способов является способ, основанный на аппроксимации огибающей эхо-импульса полиномом первой степени, который защищен патентом РФ (рис.2). Устройство для реализации этого способа содержит два компаратора с отличающимися порогами срабатывания. Срабатывание первого компаратора, имеющего уровень U_1 , происходит в момент времени t_1 , срабатывание второго компаратора, имеющего уровень U_2 , происходит в момент времени t_2 . Построение прямой по координатам этих точек позволяет найти временную координату начала эхо-импульса t_p .

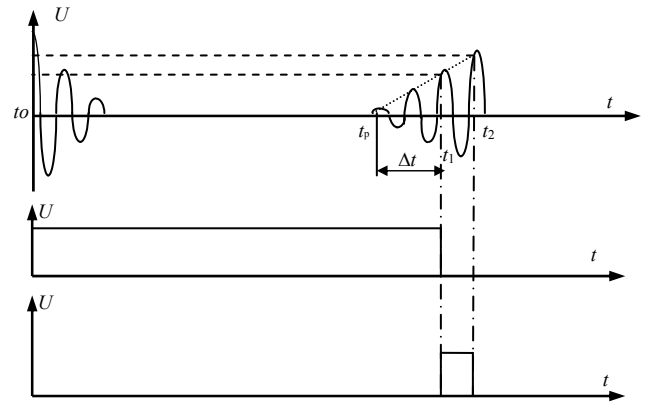


Рис. 2. Определение временного положения начала эхо-импульса способом двух компараторов

Максимальные погрешности получаются тогда, когда величины уровней компараторов U_1 и U_2 окажутся немного больше амплитудного значения напряжения предыдущих периодов (рис.3).

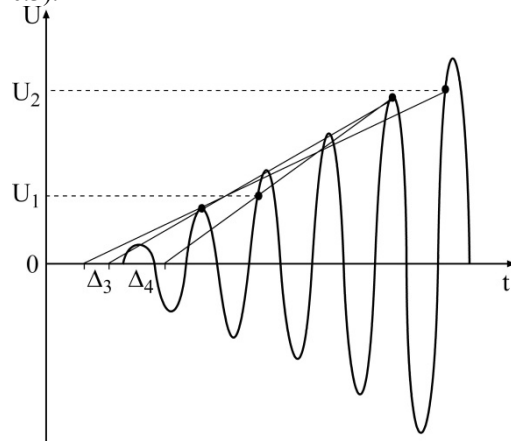


Рис. 3. Возможные варианты возникновения погрешности в определении времени прихода эхо-импульса

В этом случае произойдет перескок срабатывания компаратора на следующий период и появится погрешность Δ_3 или Δ_4 . Анализ получаемой погрешности показал, что чем больше угол наклона огибающей переднего фронта, тем меньше погрешность в определении времени начала эхо-импульса. С увеличением разницы в установлении порогов компараторов U_1 и U_2 уменьшается погрешность в определении времени начала эхо-импульса. Влияние разницы в порогах проявляется сильнее, чем влияние крутизны переднего фронта огибающей (рис.4).

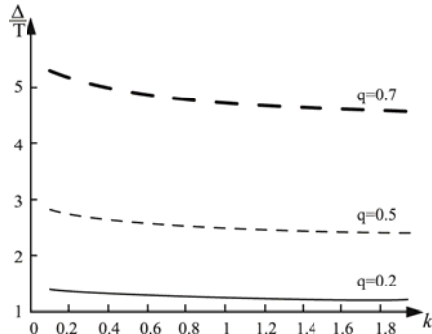


Рис.4. Зависимость величины относительной погрешности в определении времени от крутизны фронта огибающей k для разных значений отношения пороговых напряжений компараторов q

На рис.5 приведены экспериментальные зависимости величины погрешности измерения от дальности, полученные с помощью устройства, реализующего предложенный способ обработки акустических сигналов.

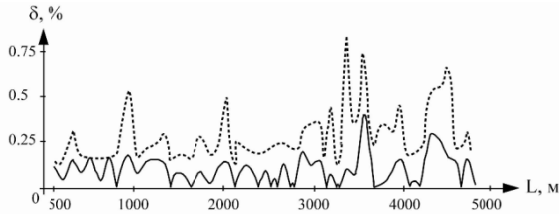


Рис. 5. Изменение погрешности измерения от дальности: пунктир – способ одного компаратора, сплошная линия – способ двух компараторов ($U_1 = 0.21U_m, U_2 = 0.85U_m$)

Применение этого способа для определения времени прихода эхо-импульса позволяет в два раза повысить точность измерения ультразвуковых приборов, использующих время-импульсный метод. Однако область применения этого способа ограничивается только случаем линейного нарастания огибающей эхо-импульса. При более сложных законах изменения нарастающей части огибающей эхо-импульса точность измерения увеличивается незначительно. В этом случае можно использовать способ, основанный на аппроксимации нарастающей части огибающей импульсного сигнала полиномом второй степени. Коэффициенты аппроксимации находятся путём решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n t_i^2 \cdot s_i = a \cdot \sum_{i=1}^n t_i^4 + b \cdot \sum_{i=1}^n t_i^3 + c \cdot \sum_{i=1}^n t_i^2 \\ \sum_{i=1}^n t_i \cdot s_i = a \cdot \sum_{i=1}^n t_i^3 + b \cdot \sum_{i=1}^n t_i^2 + c \cdot \sum_{i=1}^n t_i \\ \sum_{i=1}^n s_i = a \cdot \sum_{i=1}^n t_i^2 + b \cdot \sum_{i=1}^n t_i + c \cdot n \end{cases}$$

где n – количество точек, выбранных для полиномиальной аппроксимации; i – текущий номер экспериментальной точки, t – временная координата, s – амплитуда.

Решается полученная система уравнений с помощью метода Крамера.

Для определения минимальной частоты дискретизации входного сигнала, обеспечивающей однозначное определение экстремумов в одном периоде входного сигнала было получено выражение:

$$N = \frac{\pi}{\arccos(1 - \delta)}$$

Результат расчета, проведенный в соответствии с этим выражением, представлен на рис.6.

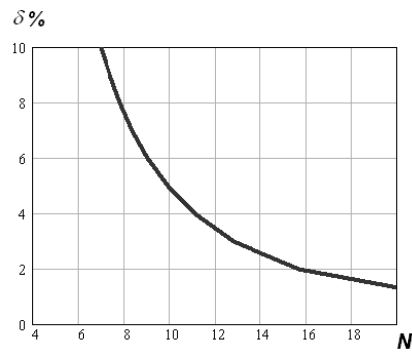


Рис. 6. Зависимость относительной погрешности в определении максимальной амплитуды от количества отсчетов на периоде

Из рисунка можно сделать вывод, что для определения экстремума с погрешностью не превышающей 5% необходимо делать не менее 10 отсчетов за период. Результаты экспериментальных исследований представлены на рис.7. Применение способа аппроксимации огибающей эхо-импульса полиномом второй степени для определения времени прихода эхо-импульса позволяет в три раза повысить точность измерения ультразвуковых приборов, использующих время-импульсный метод. Использование полинома третьей степени не дает существенного преимущества, однако сложность обработки возрастает.

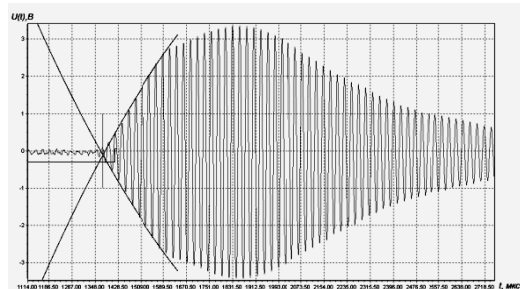


Рис. 7. Аппроксимация нарастающей части эхо-импульса полиномом второго порядка

Возможности современных однокристалльных микропроцессоров с обширной периферией позволяют использовать сложные алгоритмы обработки информации с целью определения начала УЗ импульса. Одним из путей достижения этой цели является использование зависимости длительности импульса, получаемого с выхода компаратора при сравнении эхо-импульса с фиксированным уровнем, от амплитуды в каждом периоде эхо-сигнала (рис.8).

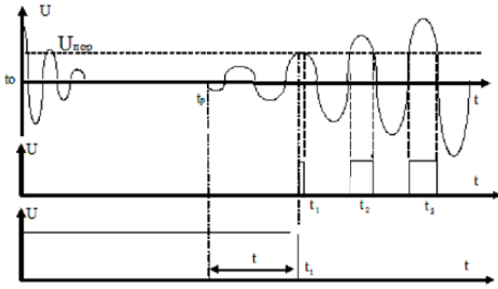


Рис.8. Диаграмма начала эхо-сигнала (а), импульсы на выходе компаратора (б) и погрешность в определении времени распространения эхо-импульса (в)

Амплитудное значение синусоидального сигнала на входе компаратора определяется через длительность импульса на его выходе по следующему выражению:

$$U_m = \frac{U_{пор}}{\sin\left(\pi \cdot \left(1 - \frac{\Delta t}{T} \cdot \frac{1}{2}\right)\right)}$$

где Δt - длительность импульса на выходе компаратора; T - период входного сигнала; $U_{пор}$ - опорное напряжение на входе компаратора.

Для получения аппроксимирующего выражения огибающей импульсного сигнала необходимо использовать минимум 3 точки, координаты которых используются при расчете огибающей. Первая координата это амплитуда, вторая координата – это время, которое определяется из выражения:

$$t = t_k + \left(\frac{T}{2} + \frac{\Delta t}{2}\right),$$

где t_k - временная координата срабатывания компаратора.

Используя методику, приведенную выше, составляется система уравнений, из которой определяются коэффициенты аппроксимации. Эти коэффициенты затем используются для расчета времени прихода эхо-импульса.

Выражение для относительной погрешности в определении максимальной амплитуды δU_m от относительной длительности импульса на выходе компаратора имеет вид:

$$\delta U_m = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\Delta \varphi}{2} \cdot \Delta(\Delta \varphi)$$

Результаты расчета зависимости относительной погрешности в определении максимальной амплитуды от длительности импульса на выходе компаратора приведены на рис.9.

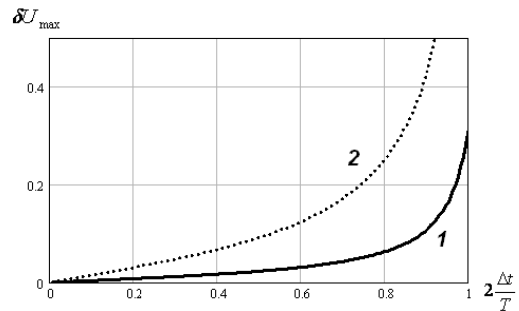


Рис. 9. Зависимость относительной погрешности в определении максимальной амплитуды от длительности импульса на выходе компаратора: 1 – для погрешности определения фазы $\varphi = 5\%$; 2 – для погрешности определения фазы $\varphi = 20\%$

Из рисунка видно, что чем больше длительность импульса на выходе компаратора, тем выше погрешность в определении максимальной амплитуды и тем выше погрешность в определении времени прихода эхо-сигнала. Кроме того, погрешность в определении максимальной амплитуды возрастает с увеличением погрешности вычисления фазы синусоидального сигнала в момент срабатывания компаратора. Поэтому этот способ можно применять только для эхо-сигналов с малой крутизной переднего фронта огибающей эхо-сигнала и для расчета использовать только первые импульсы на выходе компаратора.

Результаты аппроксимации представлены на рис.10

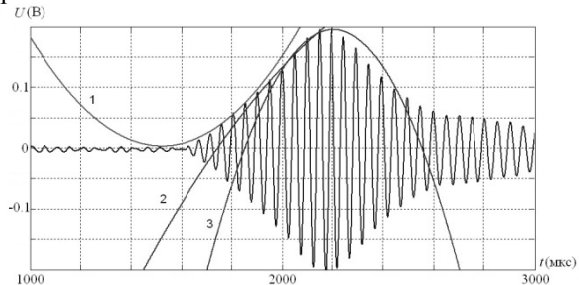


Рис. 10. Осциллограмма эхо-сигнала с огибающими, построенными на уровнях $0,2U_m$ (кривая 1); $0,5U_m$ (кривая 2); $0,6U_m$ (кривая 3)

Можно видеть, что первая огибающая, построенная при уровне порога сравнения компаратора, равном 20 % от максимальной амплитуды сигнала, не пересекает нулевую ось, а огибающие, построенные при уровнях 50 % и 60 %, имеют точку пересечения с нулем, определяя, таким образом, момент прихода отражённого

сигнала. В целом, исследования показали, что условие пересечения огибающей нулевой линии выполняется, если пороговый уровень установлен в пределах более 35 % от максимальной амплитуды принятого сигнала.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 11.

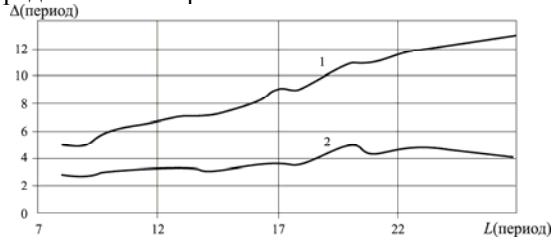


Рис. 11. Зависимость погрешности определения начала эхо-сигнала от длительности фронта его огибающей при использовании метода одного компаратора (кривая 1); при использовании метода огибающей (кривая 2)

Из рис. 11 видно, что при изменении длительности фронта принятого сигнала в широких пределах погрешность измерения предложенным способом не превышает 5 периодов и слабо зависит от данного параметра. В тоже время для способа одного компаратора погрешность возрастает пропорционально увеличению длительности фронта сигнала и достигает значения 13 периодов. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало, что среднеквадратичное отклонение не превышает 10 %. Это подтверждает правильность выбора формы огибающей сигналов, достоверность полученных результатов и их практическую ценность.

Применение способа, основанного на измерении длительностей импульсов на выходе порогового устройства для определения времени прихода эхо-импульса позволяет в три раза повысить точность измерения ультразвуковых приборов, использующих время-импульсный метод. Однако этот способ применим только для низкочастотных сигналов, имеющих большой период несущей частоты зондирующего сигнала, что позволяет измерять длительность импульсов на выходе порогового устройства с погрешностью не более 1% от периода несущей частоты зондирующего сигнала. Для получения высоких метрологических характеристик ультразвуковых локаторов необходимо использовать только первые импульсы на выходе порогового устройства, т.к. приращения длительности последующих импульсов уменьшаются по экспоненциальному закону.

Выводы

Применение способа двух компараторов для определения времени прихода эхо-импульса позволяет в два раза повысить точность измерения ультразвуковых приборов, использующих время-импульсный метод. С увеличением крутизны

нарастающей части огибающей эхо-импульса уменьшается погрешность в определении начала эхо-импульса. С увеличением разницы в установлении порогов компараторов U_1 и U_2 также уменьшается погрешность в определении времени начала эхо-импульса. Влияние разницы в порогах проявляется сильнее, чем влияние крутизны переднего фронта огибающей. Однако выбор оптимальных порогов требует детального анализа акустического тракта измерительного прибора. Кроме этого, на результаты измерения будет влиять точность измерения интервала времени между включениями компараторов. При использовании четырех компараторов (два - с отрицательными пороговыми напряжениями, два - с положительными; искомое время находится на пересечении двух прямых) точность измерения увеличивается несущественно, зато усложняется принципиальная схема прибора.

Применение способа аппроксимации нарастающей части эхо-импульса полиномом второй степени для определения времени прихода эхо-импульса позволяет в три раза повысить точность измерения ультразвуковых приборов, использующих время-импульсный метод. Однако для получения высоких метрологических характеристик необходимо обеспечить не менее 10 отсчетов за период, поэтому область применения способа ограничивается частотами до 10 МГц.

Применение способа измерения длительностей импульсов на выходе порогового устройства для определения времени прихода эхо-импульса позволяет в три раза повысить точность измерения ультразвуковых приборов, использующих время-импульсный метод. Однако этот способ применим только для низкочастотных сигналов, имеющих большой период несущей частоты зондирующего сигнала, что позволяет измерять длительность импульсов на выходе порогового устройства с точностью не хуже 1% от периода несущей частоты зондирующего сигнала. Для получения высоких метрологических характеристик ультразвуковых локаторов необходимо использовать только первые импульсы на выходе порогового устройства, т.к. погрешность определения длительности последующих импульсов возрастает по экспоненциальному закону.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ОТБОРА ДЛЯ КОМПТОНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ НА БАЗЕ ПИНХОЛА

Мудров М.А.

Томский политехнический университет

E-mail: rcc@introscopy.tpu.ru

Рентгеновская томография в последнее десятилетие стала одним из наиболее эффективных методов диагностики как в технических приложениях, так и в медицине [1]. Существуют два типа рентгеновских томографов:

- трансмиссионный, который восстанавливает (реконструирует) объект на основе регистрации прошедшего через него излучения;

- на рассеянном излучении, в котором восстановление осуществляется на основе анализа рассеянного от объекта излучения.

К числу объектов контроля, исследование которых возможно лишь с применением томографии на рассеянном излучении, можно отнести следующие: многослойные корпуса торпедных катеров, поиск за корпусом или под палубой несущих балок, ребер жесткости, исследование динамики внешнего воздействия на защитные оболочки в авиации, судостроении, корпуса многих изделий в ракетно-космической технике, имеющие диаметр до 8 метров. Причем акустическое, магнитное, тепловое и другие виды контроля в большинстве случаев оказываются неприменимыми. При регистрации обратно рассеянного излучения взрывчатые вещества имеют больший контраст по сравнению с бытовыми предметами, чем при регистрации трансмиссионного излучения.

Возможность использования обратно рассеянного рентгеновского и гамма – излучения основана на том, что интенсивность зарегистрированного детектором сигнала определяется функцией распределения в пространстве объекта источников излучения и 3^x координатной функцией пространственной чувствительности детектора.

Комптовская томография - тема исследований, находящаяся на национальном уровне в США, для контроля обшивки авиации [2]. На рисунке 1 приведен график числа рассеянных фотонов по глубине обшивки, а под ним этот же участок, но рассмотренный в сканирующем электронном микроскопе (для проверки точности измерений, полученных путём обратного рассеяния).

В Бразилии комптовская томография широко используется для определения плотности и влажности почвы. Рисунок 2 представляет собой продольные сечения образцов почвы. Число зарегистрированных обратно рассеянных квантов представлено определённым цветом [3].

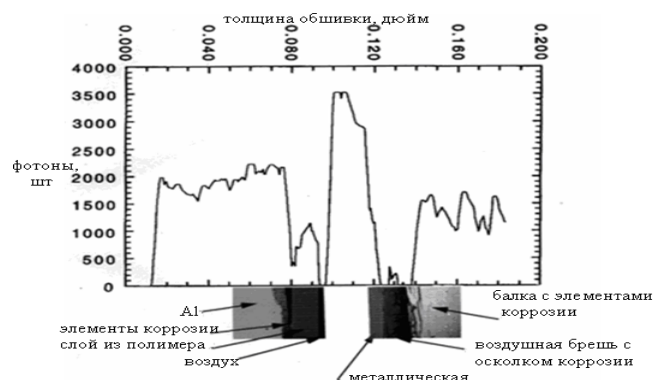


Рис. 1. Исследование обшивки авиации

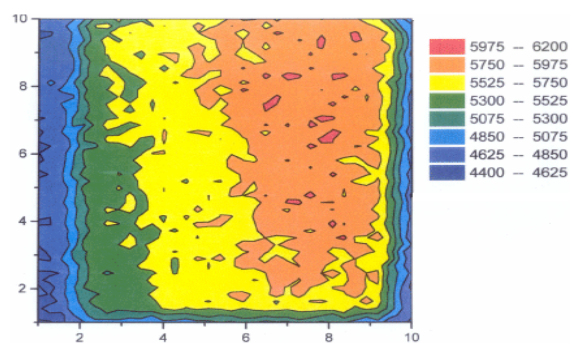


Рис.2. Распределение плотности в сечении почвы

Пинхол представляет собой отверстие небольшого диаметра (до 10мм) в пластине (рис.3). Также существуют системы отбора на базе пинхола, где в форме конструктивного элемента, используется конус (находят широкое применение в медицинских исследованиях) (рис 4).

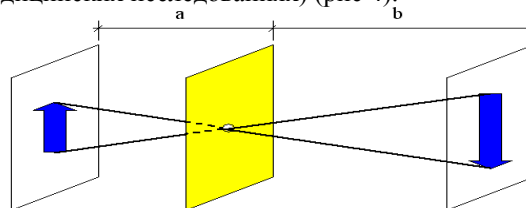


Рис.3 .Геометрия переноса изображения с помощью пинхола



Рис. 4. Пинхол

Ниже приведены характеристики пинхольных систем коллимации [4]:

1. Фактор увеличения М (имеет знак минус, так как изображение перевернутое):

$$M = -b/a,$$

где b – расстояние между пинхолом и детектором, мм;

a – расстояние пинхол – точечный рассеиватель, мм.

2. Пространственное разрешение системы R_{sys} (под системой будем понимать пинхол плюс детектор):

$$R_{sys} = (R_{ph}^2 + (R_i/M)^2)^{1/2}$$

где R_{ph} – пространственное разрешение пинхола, мм;

R_i – собственное разрешение детектора (например, сцинтилляционного кристалла), мм.

3. Пространственное разрешение пинхола R_{ph} :

$$R_{ph} = d(b+a)/b,$$

где d – диаметр пинхола, мм.

4. Чувствительность G:

$$G = 1/16 \cdot (d/b)^2 \cdot (a+b).$$

5. Эффективный диаметр d_e :

$$d_e = \sqrt{d(d + 2\mu^{-1} \tan(\alpha/2))},$$

где μ – линейный коэффициент поглощения стенками пинхола, $см^{-1}$;

α – конический угол коллиматора, град.

В известных работах по коллимированию с помощью пинхола, как правило, не учитывается фактор неоднородности систем регистрации, связанные с формой “губок” пинхола. Детальное описание апертурной функции рассеивающего объёма (АФРО) пинхола должно учитывать как геометрические искажения, так и учёт поглощения в “губках”. Рассмотрение геометрии (рисунок 5 и 6) прохождения рассеянного излучения через пинхол в виде обычного отверстия и с треугольными губками позволяет вывести соотношения относительного изменения интенсивности потока излучения ($I(Q/2)/I_0$) на детекторной секции от длины пути излучения в материале пластины:

$$I(Q/2)/I_0 = \exp(-7,022 \cdot \frac{50,50 \cdot \text{tg}(Q/2) - 0,25}{\sin(Q/2)}), \quad (1)$$

$$I(Q/2)/I_0 = \exp(-7,022) \cdot \sqrt{\left(\frac{50,5}{2,02 + \text{ctg}(Q/2)} - \frac{50,5}{\text{ctg}(Q/2)}\right)^2 + \left(\frac{102}{2,02 - \text{ctg}(Q/2)} - 1\right)^2} \quad (2)$$

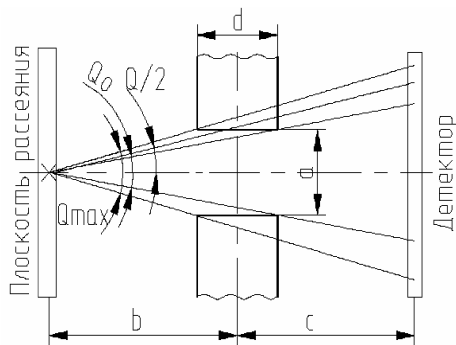


Рис. 5. Геометрия ослабления в стенках пинхола (c = b = 50mm, a=d=1mm)

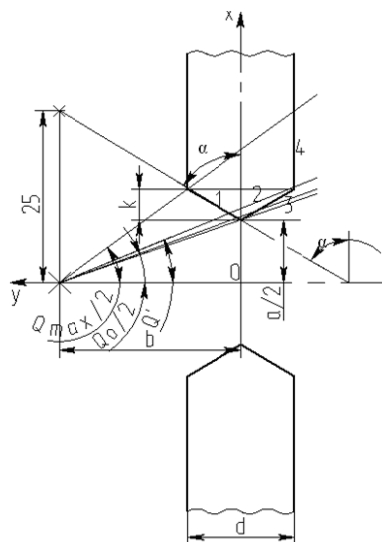


Рис. 6. Геометрия прохождения рассеянного излучения через пинхольную систему отбора с треугольными губками

Графики зависимостей относительно изменения интенсивности излучения для пинхолов с различными формами губок представлены на рисунках 7 и 8.

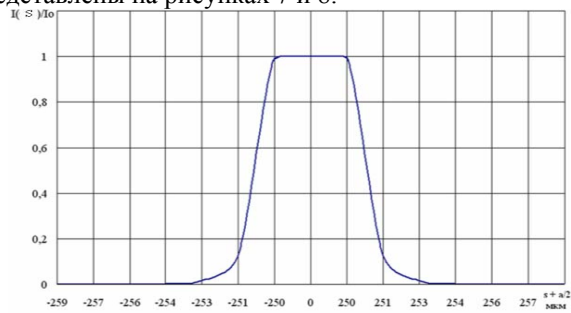


Рис. 7. Апертурная функция пинхольной системы отбора

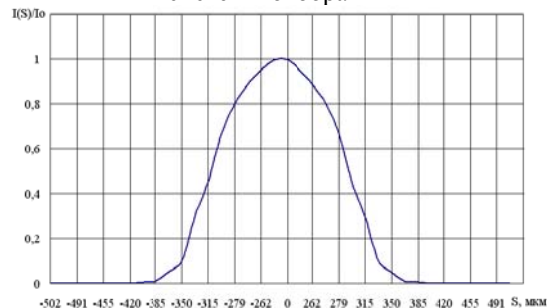


Рис. 8. Апертурная функция пинхола с треугольными губками

Эти апертурные функции являются базой для разработки алгоритма реконструкции в комптоновской томографии. Приведённые в данной статье результаты позволяют впервые заложить в алгоритм реконструкции представления АФРО в виде непрерывной функции.

Также была получена (формула 3) и построена зависимость уменьшения телесного угла влета

рассеянных гамма – квантов от координаты x точечного рассеивателя P1 (рисунок 10).

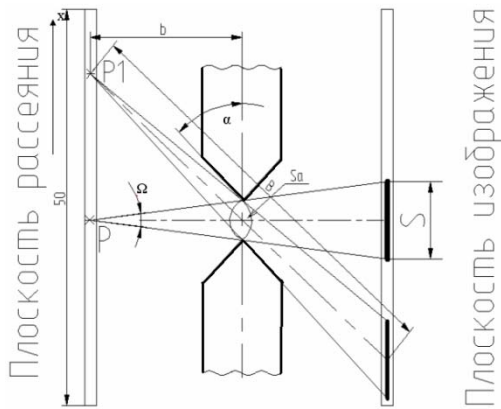


Рис. 9 – Геометрия изменения телесного угла Ω в зависимости от координаты точечного рассеивателя x .

$$\Omega(x) = \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{\cos \left(\arctg \frac{X}{50} \right) \cdot 0,25}{\left(\left(\frac{X}{\sin \left(\arctg \left(\frac{X}{50} \right) \right)} \right)^2 + (0,25)^2 - 0,5 \cdot X \right)^{0,5}} \right) \cdot \frac{X}{\sin \left(\frac{X}{50} \right)}$$

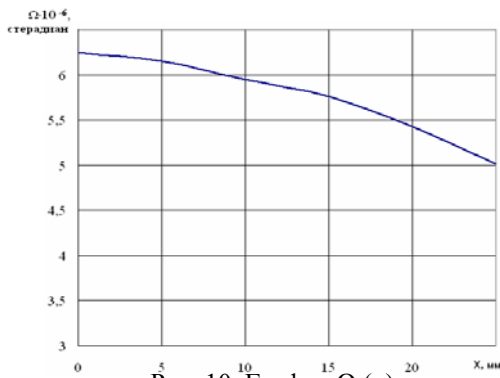


Рис. 10. График $\Omega(x)$

После необходимых расчётов характеристик, приведённых выше, были получены изображения сечения фантома, представленного на рисунке 11 материал – органическое стекло с высверленными отверстиями 4 мм. на рентгеновскую плёнку KODAK “INDUSTREX HS800 FILM” с помощью систем на базе пинхола с отверстиями различных диаметров 3, 2 и 1мм. На рисунках 12 приведены изображения, полученные после проявления рентгеновской плёнки.

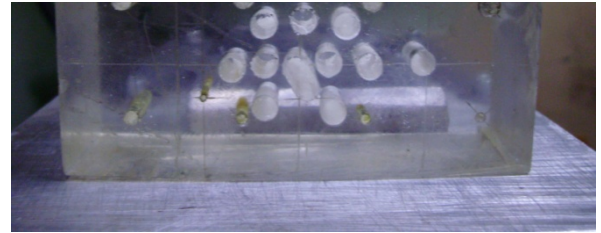


Рис. 11. Объект контроля

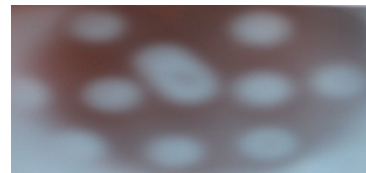
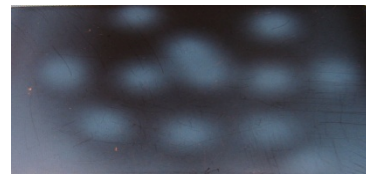


Рис. 12. Изображения на пленке, полученные с помощью пинхолов диаметров 3, 2 и 1 мм соответственно

Фотометрия пленок определила пространственное разрешение изображения объекта мониторинга менее 1мм только на пленке, на которой регистрировались рассеянные гамма – кванты с помощью пинхола с диаметром отверстия. Таким образом, можно сделать вывод по результатам эксперимента, что пинхол диаметром 1мм обеспечивает пространственное разрешение порядка 1мм.

Пинхольные системы являются перспективными для целей коллимации рассеянного излучения в досмотровых системах (аэропорты, порты, таможни и т.д.) и при проведении контроля зданий и сооружений по альбедным данным при проведении экспертизы промышленной безопасности. Для медицинских целей такие коллимирующие системы имеют проблематичность в применении, связанную в ограниченной дозовой нагрузке на пациента.

В нашей стране комптоновская томография не используется для контроля по причине сложных и дорогостоящих аппаратных и программных средств для обработки данных и визуализации изображения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капанов Б. И., В.Я. Маклашевский, В.Н. Филинов и др. Томография на комптоновском обратном рассеянии. Состояние и перспективы (обзор) // Дефектоскопия. – 1994. - № 10 - С. 36-53.

2.L. Lawson "Backscatter Imaging", // NDT Handbook: Radiographic Testing, third edition, 2003.

3. Paulo E. Cruvinel, Fatai A. Balogun. Compton scattering tomography for agricultural measurements.

Engineer Agricultural, Jaboticabal, v.26, n.1, p.151-160, jan./abr. 2006.

4. Frederic H. Fahey, Kerry L. Grow, Richard L. Webber, Beth A. Harkness, Ersin Bayram, Paul F. Hemler. THE JOURNAL OF NUCLEAR MEDICINE • Vol. 42 • No. 7 • July 2001, p.1121 – 1127.

Научное издание

ИННОВАЦИИ В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ SibTest

Сборник научных трудов
I Всероссийской научно-практической конференции
по инновациям в неразрушающем контроле
с международным участием

Издано в авторской редакции

Компьютерная верстка *И.А. Лариошина*
Дизайн обложки *О.Ю. Аршинова*

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати 06.09.2011. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».


Печать XEROX. Усл. печ. л. 35,94. Уч.-изд. л. 32,50.

Заказ 1154-11. Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru